

УДК 556.512

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АНТРОПОГЕННЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ¹

© 2024 г. С. А. Кондратьев^{a,*}, А. Ю. Брюханов^b, М. В. Шмакова^a, А. М. Расулова^a,
Н. Е. Галахина^c, М. Б. Зобков^c, Э. В. Васильев^b, Н. С. Обломкова^b

^aИнститут озераведения РАН, Санкт-Петербург, 199178 Россия

^bИнститут агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Санкт-Петербург, 196634 Россия

^cИнститут водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, 185000 Россия

*e-mail: 3718470@gmail.com

Поступила в редакцию 13.08.2023 г.

После доработки 15.09.2023 г.

Принята к публикации 25.11.2023 г.

Собрана информация об основных источниках биогенной нагрузки на водосборе Онежского озера, а также имеющихся данных натурных наблюдений за поступлением азота и фосфора в озеро. С использованием методов математического моделирования выполнена оценка сельскохозяйственной нагрузки на озеро и возможного ее снижения в результате внедрения наилучших доступных технологий в сельскохозяйственное производство. Показано, что уменьшение сельскохозяйственной нагрузки после внедрения наилучших доступных технологий едва ли существенно повлияет на экологическое состояние Онежского озера. Проведены имитационные расчеты увеличения поступления в озеро N и P от рыбководческих хозяйств водосбора при условии сохранения темпов роста рыбозаведения на водных объектах водосбора к 2050 г. Показано, что в этом случае можно ожидать возрастание биогенной нагрузки на озеро на 3.9% по P и на 1.9% по N по сравнению с настоящим временем. При этом наиболее значимое увеличение выноса биогенных элементов может быть характерно для Заонежья: 11.2% по P и 10.6% по N. Дана оценка возможного изменения поступления N и P в озеро к концу XXI в. в результате изменения стока с водосбора при условии реализации двух RCP-сценариев. Это RCP 2.6 и RCP 8.5 – лучший и худший с точки зрения воздействия на окружающую среду. Реализация сценария RCP 2.6 может привести к повсеместному снижению биогенной нагрузки на озеро до 12.9% по N и 20.5% по P за счет уменьшения стока. При реализации экологически неблагоприятного сценария RCP 8.5 можно ожидать увеличения стока и соответствующего увеличения выноса N на 16.9% и P – на 26.7% со всего водосбора.

Ключевые слова: водосбор, Онежское озеро, биогенная нагрузка, моделирование, сельскохозяйственное производство.

DOI: 10.31857/S0321059624030056 **EDN:** AURPVY

ВВЕДЕНИЕ

Онежское – второе по величине пресноводное озеро Европы, испытывающее антропогенное влияние вследствие поступления сточных вод, сельскохозяйственной деятельности на его водосборе, развития форелеводства и поступления веществ со свалок и селитебных территорий [9]. Еще в прошлом десятилетии по содержанию общего P_{общ} озеро достигло верхней границы для олиготрофных водоемов [11]. В этой связи цель

настоящей работы – современная оценка биогенной нагрузки на Онежское озеро как на всем водосборе, так и на отдельных его частях (подбассейнах), а также выполнение имитационных расчетов возможных изменений поступления N и P в экосистему озера в результате антропогенных и климатических воздействий. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

– проведен сбор информации об основных источниках биогенной нагрузки на водосборе Онежского озера, а также данных натурных наблюдений за поступлением N и P в озеро; дана оценка вклада различных подбассейнов в фор-

¹ Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 22-17-00193).

мирование современной суммарной биогенной нагрузки на озеро;

— выполнена оценка сельскохозяйственной нагрузки на озеро, а также возможного снижения нагрузки в результате внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) в сельскохозяйственное производство;

— проведены расчеты возможного увеличения поступления N и P с водосбора в озеро к 2050 г. при сохранении темпов роста рыбоводства на водных объектах водосбора;

— дана оценка возможного изменения поступления N и P в озеро к концу XXI в. в результате реализации региональных климатических сценариев.

Онежское озеро и его крупнейший приток Илекса-Водла — верхнее звено самой большой европейской озерно-речной системы р. Невы. Озеро дренирует значительную территорию, различную по геологическому строению, рельефу, орографии и гидрографии. Территория бассейна Онежского озера вытянута в широтном направлении и асимметрична: озеро делит ее на 2 неравные части — западную (64%) и восточную

(36%), это определяет неравномерность времени добегания воды для разных притоков (рис. 1).

В естественном состоянии озеро принимало сток с водосборного бассейна площадью 53 100 км². Площадь самого водоема составляла 9720 км². После строительства в 1953 г. на р. Свири Верхнее-Свирской ГЭС озеро стало водохранилищем с водосборной площадью, равной 57 300 км², и площадью зеркала 9840 км² [3]. Приблизительно 70% территории бассейна относится к Республике Карелии, остальная часть расположена в Ленинградской, Вологодской и Архангельской областях. Более половины бассейна занято водосборами трех главных его притоков: рек Шуи (площадь водосбора 10 100 км²), Суны (7 700 км²), Водлы (13 700 км²). Вытекает из озера одна р. Свирь — крупнейший приток Ладожского озера [3].

Изучаемая территория водосбора относится к Европейской сельскохозяйственной провинции среднетаежной зоны, для которой характерны низкая биоклиматическая продуктивность и избыточное увлажнение. Сельскохозяйственное производство здесь сосредоточено в основном в южной части водосбора и представлено личными подсобными и фермерскими хозяйствами.

В последние годы в Карелии получило бурное развитие товарное рыбоводство на внутренних водоемах (преимущественно форелеводство). По объему производимой продукции Карелия занимает первое место в России. Сконцентрировано рыбоводство главным образом в северо-западных частях территории водосбора (Заонежье, водосборы Шуи и Суны).

Наиболее крупные точечные источники биогенной нагрузки (Петрозаводский и Медвежьегорский промузлы, Кондопожский ЦБК) сбрасывают очищенные и недостаточно очищенные сточные воды непосредственно в Онежское озеро. Более мелкие точечные сбросы на территории водосбора приурочены к очистным сооружениям населенных пунктов (г. Суоярви, поселки Шуя, Эссойла, Пиндуши, Новая Вилга, Марциальные воды, Пудож и др.)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

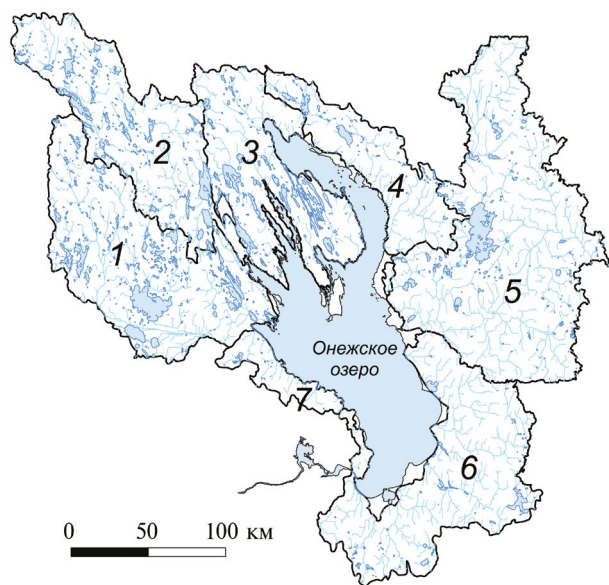


Рис. 1. Гидрографическая структура бассейна Онежского озера: водосборы рек Шуи (1) и Суны (2), Заонежье (3), водосборы восточных притоков (4), р. Водлы (5), южных (6) и западных (7) притоков.

Основной инструмент решения поставленных задач — математическая модель выноса биогенных элементов с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водные объекты ILLM, она разработана сотрудниками Института озераведения (ИНОЗ) РАН и модифицирована при участии сотрудников Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (Филиал ФНАЦ ВИМ) [1, 8, 10]. Согласно принятой схеме расчета, основные составляющие внешней нагрузки валовых (нефильтрованных) форм N и P на водный объект — 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. Эффективное средство расчета нагрузки на полях сельхозпредприятий — блок модели, предложенный специалистами ИАЭП, достоинство которого — расчет выноса биогенных элементов не только с учетом доз внесения удобрений и выноса азота и фосфора с урожаем, но и в зависимости от типов почв на территории сельскохозяйственного водосбора, их механического состава, удаленности поля от водного объекта. Кроме того, модель позволяет давать оценку снижения биогенной нагрузки при использовании наилучших доступных технологий ведения сельскохозяйственного производства. Модель работает с шагом по времени в 1 год. В материалах Хельсинкской комиссии [12] представлено описание моделей, которые могут использоваться для расчета внешней нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря. В их число входит и модель ILLM.

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. Один из рекомендованных Хельсинкской комиссией методов расчета удержания химических веществ водосборами и их гидрографической сетью [12] — эмпирическая зависимость, связывающая безразмерный коэффициент удержания k с модулем

стока q (л/(км² с)): $k = 1 - 1/(1 + aq^b)$ (a и b — безразмерные эмпирические параметры, $a = 26.6$, $b = -1.71$) [18]. При отсутствии стока ($q = 0$) имеет место максимальное удержание, выраженное коэффициентом $k = 1$, вынос отсутствует, все биогенные вещества, поступившие на водосбор, на нем и остаются. С увеличением стока вынос увеличивается, соответственно — удержание биогенных веществ водосбором и его гидрографической сетью уменьшается.

В качестве входной информации для выполнения расчетов необходимы сведения о подстилающей поверхности разного типа, формирующей рассредоточенный вынос биогенных элементов со стоком; об интенсивности точечных источников, сбрасывающих стоки в гидрографическую сеть водосбора; об атмосферных выпадениях азота и фосфора; о количестве произведенной продукции на рыбоводческих фермах; о количестве домашних животных и птицы, а также внесенных минеральных и органических удобрений.

С целью информационного обеспечения модели проведена классификация типов подстилающей поверхности водосбора. Дифференциация земного покрова проводилась на основе коллекций многоспектральных спутниковых снимков. В данном исследовании использовалась коллекция Copernicus Global Land Service Collection 3 (CGLS-LC100) [13, 14], которая основана на спутниковых снимках PROBA-V, Sentinel-2, Landsat 7, 8. Для базовой классификации поверхности зданий и инфраструктуры, леса и гидрографической сети использовалась цифровая модель рельефа WorldDEM™, составленная по данным спутников TanDEM-X и TerraSAR-X. Пространственное разрешение данных коллекции CGLS-LC100 составляет 100 м. Детальная дифференциация подстилающей поверхности на водосборе проводилась в соответствии с рекомендациями Продовольственной и сельскохозяйственной Организации объединенных наций (FAO) [18]. Анализ подстилающей поверхности показал, что на различные типы леса приходится >80% площади всего водосбора, постоянные водоемы занимают ~7% (наибольшая доля — в районе Заонежья и наименьшая — в районе западных притоков). На сельскохозяйственные угодья приходится ~1% площади всего водосбора, при этом

наибольшая доля возделываемых территорий приходится на водосборы южных притоков и р. Шуи. Урбанизированные территории составляют <0.1% площади водосбора и распределены неравномерно по его подбассейнам. Для расчета нагрузки на водный объект наиболее приемлемым было выделение пяти классов: поймы, луга, лесостепь; сельскохозяйственные угодья; города и другие антропогенные ландшафты; лес, болото; постоянные водные объекты. Для каждого типа подстилающей поверхности на основе анализа данных из [8] приближенно оценены эмиссионные характеристики поступления $N_{\text{общ}}$ и общего $P_{\text{общ}}$ в сток.

Для оценки вклада точечных источников в формирование биогенной нагрузки на озеро была предпринята попытка использования данных статистических форм 2ТП-водхоз, которая закончилась неудачно ввиду их абсолютной информационной неадекватности. Как отмечено в работе [9], "... данные статотчетности "2ТП-водхоз" для расчета нельзя использовать. Во-первых, в них отсутствуют сведения по содержанию $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$, необходимые для оценки биогенной

нагрузки на озеро. Во-вторых, нет уверенности в достоверности значений...". Поэтому в настоящей работе при расчетах внешней нагрузки на озеро использованы данные по содержанию N и P в сточных водах точечных источников, полученные специалистами ИВПС КарНЦ РАН за многолетний период, а именно: 738 тN/год и 65.3 тP/год для всего водосбора с последующим распределением по подбассейнам пропорционально их площади. Также на основе данных работы [9] задавались значения атмосферных выпадений: 0.046 тN/(км² год) и 0.0013 тP/(км² год).

Данные по объемам товарной продукции рыбоводства в Карелии получены из [4–6] и в Ассоциации форелеводов Карелии. При этом принято, что на водосборе Онежского озера выращивается 33% всей карельской форели [9]. В пределах рассматриваемого водосбора наибольшее количество товарной форели производится в бассейне р. Суны (старое русло р. Суны и Кондопожский канал) – 46% производимой на водосборе озера. На водоемах Заонежья выращивается 35% всей форели, а в бассейне

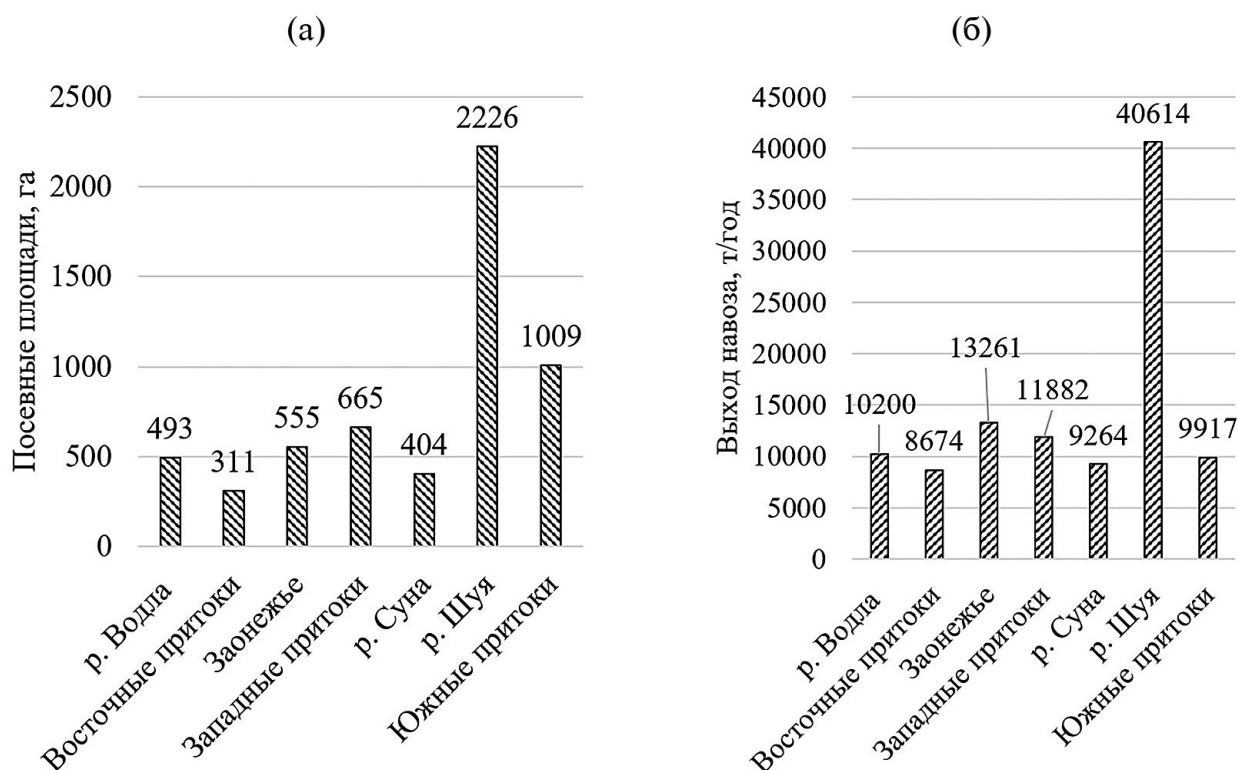


Рис. 2. Посевные площади (а) и выход навоза в животноводстве (б) изучаемых подбассейнов.

р. Шуи – 19%. Эти величины приняты постоянными для распределения объемов выращивания форели по подбассейнам на водосборе озера при выполнении расчетов на перспективу. По данным [6], от 1 т товарной продукции рыбоводства в водные объекты поступает 8 кг $P_{\text{общ}}/\text{год}$ и 50 кг $N_{\text{общ}}/\text{год}$. По данным ХЕЛКОМ [17] – 7 кг $P_{\text{общ}}/\text{год}$ и 50 кг $N_{\text{общ}}/\text{год}$. Собранная информация позволила установить тренды возрастания рыбопродуктивности и соответствующей биогенной нагрузки на водные объекты за последние годы как на всем водосборе, так и на трех основных рыбопроизводящих подбассейнах: Заонежье и водосборах Суны и Шуи.

В результате сбора данных для оценки поступления N и P в водные объекты изучаемых подбассейнов от сельскохозяйственного производства за последние годы сформирована база данных о по-

головье животных, наличии органических удобрений на полях и содержании в них азота и фосфора. Также определены координаты размещения крупных сельскохозяйственных товаропроизводителей, получены данные о количестве N и P в составе используемых минеральных удобрений, оценена площадь возделываемых сельскохозяйственных земель, рассчитано удельное поступление $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ на один га возделываемых сельскохозяйственных земель. На рис. 2 представлено распределение по изучаемым подбассейнам посевных площадей и объемов образуемого навоза в животноводстве. Из приведенных данных следует, что наибольшая сельскохозяйственная активность характерна для водосбора р. Шуи.

Для верификации модели по всему водосбору Онежского озера и по отдельным его подбассейнам использовались данные, представленные

Таблица 1. Вынос $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ (т/год) с изучаемых подбассейнов по данным мониторинга Росгидромета и натурных исследований ИВПС КарНЦ РАН

Год	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$
	Водла		Шуя		Суна		Запад		Заонежье		Восток		Юг	
2000	183	3283	133	1979	30	1309	7	358	33	1102	49	686	166	1931
2001	183	3330	141	2111	30	1313	7	374	33	1097	50	705	166	1982
2002	145	2665	106	1594	27	1173	5	277	30	988	40	570	130	1596
2003	173	3056	120	1785	29	1248	7	331	32	1058	45	630	158	1780
2004	233	4123	174	2581	38	1636	9	474	41	1386	61	853	210	2403
2005	194	3546	141	2109	34	1507	7	374	38	1264	54	753	177	2118
2006	157	2814	94	1411	28	1234	5	257	31	1038	42	589	145	1665
2007	194	3535	148	2208	33	1446	7	392	36	1220	53	752	175	2109
2008	249	4395	178	2696	30	1303	10	533	41	1362	68	947	220	2536
2009	183	3315	138	2080	27	1179	9	444	39	1319	58	813	195	2260
2010	152	2769	115	1740	23	1035	7	382	34	1140	51	721	169	2020
2011	139	2557	119	1806	21	939	6	338	34	1155	46	652	156	1836
2012	204	3636	159	2381	36	1528	7	387	36	1221	55	774	188	2177
2013	152	2728	102	1556	25	1113	5	282	34	1136	46	652	154	1833
2014	155	2867	70	1067	23	1058	5	260	29	975	37	523	120	1466
2015	150	2719	97	1463	27	1178	5	243	26	884	35	499	118	1400
2016	155	2795	146	2173	26	1172	7	339	35	1165	52	732	179	2060
2017	231	4110	182	2725	32	1390	8	416	38	1277	57	804	198	2267
2018	186	3344	132	2005	27	1231	7	362	36	1208	50	696	163	1958
2019	193	3460	100	1520	24	1083	5	276	30	1017	44	620	151	1749
2020	227	4130	163	2483	35	1564	6	301	32	1064	45	627	151	1764
2021	172	3093	127	1903	31	1353	7	343	34	1141	46	650	158	1834

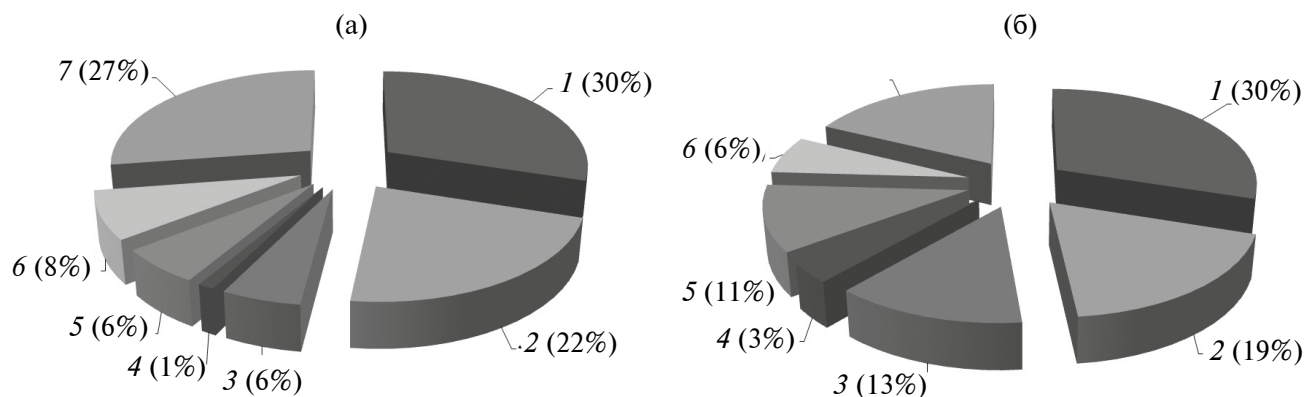


Рис. 3. Долевой вклад выноса фосфора (а) и азота (б) с изучаемых подбассейнов в суммарную нагрузку на Онежское озеро в 2021 г. (год средней водности): 1 – р. Водла, 2 – р. Шуя, 3 – р. Суна, 4 – западные притоки, 5 – Заонежье, 6 – восточные притоки, 7 – южные притоки.

в табл. 1 и полученные в результате синтеза материалов государственного мониторинга Росгидромета и натурных исследований ИВПС КарНЦ РАН на притоках Онежского озера.

На рис. 3 представлены доли выноса Р и N с подбассейнов в суммарной биогенной нагрузке на Онежское озеро в 2021 г. (год средней водности). Нетрудно видеть, что основные поставщики биогенных элементов в озеро – южные притоки, а также реки Шуя и Водла.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка сельскохозяйственной нагрузки на озеро, а также возможного снижения нагрузки в результате внедрения НДТ в сельскохозяйственное производство

Как отмечено выше, при расчете выноса N и P в первичные звенья гидрографической сети водосбора Онежского оз. и его подбассейнов использовалась модель, в состав которой входит блок, реализующий методику ИАЭП по детальному описанию выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных территорий [1]. По этой методике в расчетах учитываются следующие основные факторы выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных полей:

- содержание N и P в почве, доля их выноса в общем содержании в почве;
- количество N и P в составе минеральных удобрений и коэффициент их эмиссии;
- количество N и P в составе органических удобрений и коэффициент их эмиссии;

- удаленность контура сельскохозяйственных угодий от водных объектов;
- тип почв по происхождению;
- тип почв по механическому составу;
- структура сельхозугодий (соотношение площадей пашни и многолетних трав, лугов, пастбищ, залежи);
- использование НДТ ведения сельскохозяйственного производства.

Один из основных способов повышения экологической безопасности интенсивного сельскохозяйственного производства – переход на наилучшие доступные технологии. К числу НДТ относятся [2] технологические процессы, методы, порядок организации производства продукции и энергии, выполнения работ или оказания 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. НДТ ведения сельскохозяйственного производства подразумевает выполнение следующих действий:

- ленточное внесение удобрений; поверхностная или внутриводная инъекция при внесении жидкого навоза;
- заделка навоза, нанесенного на поверхность почвы, путем вспашки или использования почвообрабатывающих машин, таких как культиваторы или дисковые бороны, в зависимости от типа почвы и условий; навоз полностью смешивается с почвой или зарывается;

— соблюдение определенного расстояния между полями, куда вносится навоз, с оставлением необработанной полосы земли вдоль водных объектов;

— исключение внесения навоза, когда риск образования стоков представляется значительным; в частности, навоз не следует вносить, когда поле залито паводковой водой, замерзло или покрыто снегом, почвенные условия (например, насыщенность влагой или уплотненность) в сочетании с уклоном поверхности и/или полевой дренажной системой таковы, что высок риск образования стоков или дренажа, а также можно ожидать образования стоков на основе прогнозируемых атмосферных осадков;

— соблюдение норм внесения навоза с учетом содержания N и P в навозе и характеристик

почвы, содержания в ней питательных веществ, сезонных потребностей выращиваемых культур и погодных или полевых условий, которые могут привести к образованию стоков;

— проверка рабочего состояния техники для внесения навоза и настройка ее на норму внесения;

— применение герметичных навозохранилищ;

— временное накопление твердых органических удобрений на ровных полевых площадках перед внесением на расстоянии ≥ 500 м от водных объектов.

Внедрение НДТ — наиболее эффективный способ обеспечения нормативов качества окружающей среды, нормативов допустимого воздействия на окружающую среду при условии экономической целесообразности и техниче-

Таблица 2. Результаты возможного снижения биогенной нагрузки на водосборную территорию в пределах административных районов за счет внедрения НДТ в сельскохозяйственное производство (прочерк — данные отсутствуют)

Подбассейн	Административный район	Посевная площадь, га	N, т/год	N с НДТ, т/год	P, т/год	P с НДТ, т/год
р. Водла	Вытегорский	12.39226	—	—	—	—
	Каргопольский	146.0362	0.67	0.65	0.025	0.025
	Онежский	67.5219	0.54	0.51	0.026	0.025
	Плесецкий	179.6136	1.50	1.46	0.063	0.062
	Пудожский	86.99711	3.15	2.59	0.131	0.116
Восточные притоки	Медвежьегорский	294.8519	2.61	2.41	0.074	0.071
	Пудожский	15.66942	0.10	0.08	0.003	0.003
	Сегежский	0.049371	—	—	—	—
Заонежье	Кондопожский	250.6559	3.79	3.54	0.110	0.106
	Медвежьегорский	303.8892	5.71	5.27	0.163	0.156
Западные притоки	Прионежский	664.9832	13.60	12.85	0.324	0.314
р. Суны	Кондопожский	313.3065	5.96	5.56	0.198	0.191
	Медвежьегорский	43.19305	0.33	0.31	0.013	0.012
	Муезерский	7.398676	0.39	0.36	0.014	0.013
	Пряжинский	16.98511	—	—	—	—
	Суоярвский	22.84966	0.38	0.34	0.013	0.012
р. Шуя	Кондопожский	103.2816	2.40	2.24	0.069	0.066
	Прионежский	417.3859	9.01	8.51	0.376	0.365
	Пряжинский	1659.646	20.16	19.06	0.694	0.673
	Суоярвский	45.43776	1.01	0.90	0.041	0.039
Южные притоки	Бабаевский	7.218894	0	0	0	0
	Вытегорский	980.805	16.87	16.38	0.518	0.510
	Подпорожский	12.63172	0.40	0.35	0.018	0.017
	Пудожский	8.123309	0.17	0.14	0.006	0.006
	Сумма	5660.923	88.75	83.51	2.879	2.782

ской возможности их применения. Используемая в настоящей работе модель позволяет давать количественную оценку снижению сельскохозяйственной нагрузки на водосбор до и после внедрения НДТ.

В качестве исходных для выполнения расчетов сельскохозяйственной нагрузки биогенными элементами на первичную гидрографическую сеть использованы показатели за 2021 г. Результаты расчетов сельскохозяйственной нагрузки для основных административных регионов в пределах территории водосбора Онежского озера как в современных условиях, так и при условии внедрения НДТ представлены в табл. 2.

После детальной оценки сельскохозяйственной составляющей внешней биогенной нагрузки на отдельные подбассейны и водосбор Онеги в целом проведен расчет поступления N и P в озеро с учетом вклада других компонентов нагрузки, а также удержания биогенных элементов водосбором и первичными звеньями его гидрографической сети. Согласно расчетам по модели ILLM, нагрузка на озеро со всего водосбора в 2021 г. составляла 572.2 тP/год и 10615.7 тN/год. При этом, согласно тем же расчетам, снижение нагрузки на озеро при условии внедрения НДТ в сельскохозяйственное производство на водосборе может составить <0.01% от величины выноса в 2021 г. как по N, так и по P. Наиболее значимый вклад в снижение нагрузки на озеро за счет внедрения сельскохозяйственных НДТ вносит водосбор р. Шуи — 1.6 т/год (0.08%) по $N_{\text{общ}}$ и 0.1 т/год (0.08%) по $P_{\text{общ}}$. В такой ситуации можно утверждать, что возможные изменения сельскохозяйственной нагрузки за счет внедрения НДТ едва ли окажут существенное влияние на экологическое состояние Онежского озера. Тем не менее внедрение НДТ в сельское хозяйство региона, особенно южной его части, — эффективное средство оздоровления малых рек и водоемов, расположенных вблизи сельхозугодий.

При обсуждении перспектив улучшения экологического состояния водных объектов за счет снижения антропогенной нагрузки часто встречаются рекомендации снижения доз внесения биогенных элементов с удобрениями как одного из средств снижения риска антропогенного

эвтрофирования водоемов. Однако очевидно, что в ситуации, когда на поля вносятся меньше питательных веществ, чем выносятся с урожаем, что характерно для сельскохозяйственных угодий на водосборе Онежского озера, 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 действующий механизм сочетания снижения негативного воздействия на окружающую среду с увеличением производства сельхозпродукции и минимизацией трудо- и энергозатрат. А методы математического моделирования — эффективный инструмент количественной оценки воздействия различных компонентов сельскохозяйственного производства на окружающую среду и поиска оптимального их сочетания для достижения поставленных целей. На основе моделирования можно выявлять участки с максимальным риском биогенной нагрузки на водные объекты и разрабатывать для них перечень мероприятий по минимизации негативного воздействия. Мероприятия могут включать не только НДТ, но ряд технологических и ландшафтных решений, например создание природных биофильтров, специальных мелиорационных сооружений, применение специализированной техники для внесения удобрений и т. д.

Оценка возможного увеличения поступления азота и фосфора с водосбора в озеро к 2050 г. при сохранении темпов роста рыбоводства на водных объектах водосбора

На водосборе Онежского озера рыбоводческие хозяйства сосредоточены главным образом в Заонежье, а также на водосборах рек Суны и Шуи. Зная количество выращенной рыбы, нетрудно рассчитать поступление N и P в водные объекты исходя из известных оценочных значений биогенной нагрузки [6]. Однако значительная часть химических веществ, поступивших на водосбор от различных источников, не достигает замыкающих створов крупных рек, так как удерживается различными звеньями первичной гидрографической сети. В соответствии с материалами ХЕЛ-

КОМ [16] расчеты удержания необходимы прежде всего для того, чтобы количественно оценить соотношение между сбросами на поверхность водосбора и выносом химических веществ в водные объекты. Указанные расчеты могут выполняться с использованием следующих средств:

- результатов непосредственных измерений на входе и выходе изучаемых водных систем, позволяющих на основании данных натурных наблюдений оценивать коэффициенты удержания;
- математических моделей удержания биогенных веществ в озерах с последующим распространением результатов на всю озерно-речную сеть бассейна, участвующую в удержании;
- математических моделей, описывающих удержание гидрографической сетью, включающей как реки, так и озера.

В [16] отмечены и значительные трудности проведения необходимых измерений. При решении настоящей задачи для оценки удержания N и P водосбором и его первичной гидрографической сетью использовалась модель ILLM [8], откалиброванная по данным натурных наблюдений как для всего водосбора Онежского озера, так и для его подбассейнов (табл. 1). На рис. 4 представлены графики, построенные на основе восстановленных сотрудниками ИВПС КарНЦ РАН величин товарной продукции рыбоводческих ферм Заонежья, водосборов рек Суны и Шуи, всего водосбора озера за период 2006–2023 гг., а также результаты линейной экстраполяции графиков на период до 2050 г.

Результаты пересчета массы продукции рыбоводства в биогенную нагрузку на водные объекты водосборов использовались в качестве входной информации для расчетов по математической модели. На основе результатов моделирования

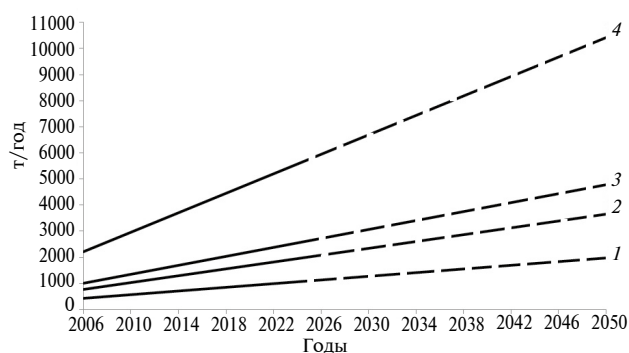


Рис. 4. Продукция рыбоводческих ферм водосбора р. Шуи (1), Заонежья (2), водосбора р. Суны (3) и всего водосбора озера (4) за период 2006–2023 гг., а также результаты линейной экстраполяции графиков на период до 2050 г.

составлена табл. 3, иллюстрирующая возможное увеличение биогенной нагрузки по N и P на Онежское озеро со стороны водосбора и отдельных подбассейнов к 2050 г. в предположении сохранения темпов развития рыбопроизводства на водных объектах водосбора.

Из табл. 3 следует, что при сохранении темпов развития рыбопроизводства на водных объектах водосбора Онежского озера в 2050 г. можно ожидать возрастание нагрузки на озеро на 3.9% по P и на 1.9% по N по сравнению с 2021 г. Из подбассейнов наиболее значимое увеличение выноса биогенных элементов может быть характерно для Заонежья: 11.2% по P и 10.6% по N. Увеличение рыбопроизводства на акватории озера в настоящей работе не рассматривалось.

Оценка возможного изменения поступления азота и фосфора в озеро к концу XXI в. в результате реализации региональных климатических сценариев

Для оценки последствий воздействия возможных климатических изменений на вынос N и P с водосбора Онежского озера взяты результа-

Таблица 3. Увеличение биогенной нагрузки на Онежское озеро со стороны водосбора и отдельных подбассейнов к 2050 г. в предположении о сохранении темпов развития рыбопроизводства на водных объектах водосбора (по результатам моделирования)

Объект	P _{общ}			N _{общ}		
	2021	2050	%	2021	2050	%
Водосбор р. Шуи	127.0	132.6	4.4	1910.0	2018.6	5.7
Водосбор р. Суны	32.5	36.0	10.7	1344.3	1398.9	4.1
Заонежье	33.1	36.8	11.2	1133.4	1253.9	10.6
Весь водосбор Онежского озера	572.2	594.8	3.9	10615.7	10777.5	1.5

ты моделирования стока с использованием двух RCP-сценариев [7] – RCP 2.6 и RCP 8.5 – соответственно лучший и худший с точки зрения воздействия на окружающую среду [15, 19–23]. Сценарий RCP 2.6 требует, чтобы выбросы CO_2 начали неуклонно снижаться и достигли нуля к 2100 г. Выбросы CH_4 должны уменьшиться наполовину, при этом уровень выбросов SO_2 составит ~10% от уровня 1980–1990 гг. В сценарии RCP 8.5 выбросы продолжают расти в течение всего XXI в. теми же темпами, что и сейчас. Числа (2.6 и 8.5) при аббревиатурах сценариев указывают на дополнительное количество энергии излучения ($\text{Вт/м}^2/\text{с}$), которое будет аккумулировано атмосферой в результате выбросов парниковых газов. Для оценки массы выноса биогенных элементов с водосбора в зависимости от изменяющегося стока здесь также использовалась математическая модель ILLM [8], прошедшая калибровку как для всего водосбора Онежского озера, так и для всех его подбассейнов по данным измерений Росгидромета и ИВПС КарНЦ. В качестве входной информации в модели использовались данные об изменении стока, представленные в табл. 4.

Результаты расчетов выноса $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ зависящего от возможных изменений стока в результате реализации климатических сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5, содержатся в табл. 5.

Нетрудно видеть, что реализация лучшего сценария антропогенного воздействия на окружающую среду (RCP 2.6) на всех объектах может привести к повсеместному снижению биоген-

Таблица 4. Изменение слоя стока (%) с изучаемых водосборов при условии реализации климатических сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 для периода 2086–2100 гг. по данным работы [7]

Объекты исследования	RCP 2.6	RCP 8.5
р. Водла	–18	18
р. Суна	–6.3	4.3
р. Шуя	–7.3	16
Весь водосбор	–10.5	12.8

ной нагрузки на озеро за счет снижения стока. В целом для водосбора Онежского озера такое снижение может составить 12.9% по N и 20.5% по P. При реализации экологически неблагоприятного сценария (RCP 8.5) следует ожидать увеличения стока и соответствующего увеличения выноса N на 16.9%, P – на 26.7% со всего водосбора. Для отдельных подбассейнов рассчитанные возможные изменения биогенного выноса могут быть более значительными (в процентном отношении).

В то же время можно заметить, что какие-либо оценки и прогнозы развития социально-экономической деятельности человека на перспективу до 2100 г. – весьма неблагоприятное занятие. Скорее всего изменение климата в результате деятельности человека будет происходить по некоему промежуточному сценарию, так как, с одной стороны, человечество предпринимает значительные усилия по снижению выбросов в атмосферу, с другой – едва ли удастся даже к концу XXI в. достигнуть внедрения “зеленых технологий” во все сферы хозяйственной де-

Таблица 5. Рассчитанные изменения выноса $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ с водосборов рек Шуи, Суны и Водлы в конце XXI в. по сравнению с 2021 г. в соответствии с климатическими сценариями RCP 2.6 и RCP 8.5

Объекты	2021 г.	2086–2100 гг. RCP 2.6	%	2086–2100 гг. RCP 8.5	%
р. Водла					
N, т/год	3101.01	2416.4	-22.1	3797.0	22.4
P, т/год	179.0	121.0	-32.4	239.1	33.6
р. Суна					
N, т/год	1344.3	1206.7	-10.2	1438.7	7.0
P, т/год	32.5	18.1	-44.3	42.2	29.8
р. Шуя					
N, т/год	1910	1751.0	-8.3	2262.1	18.4
P, т/год	127.0	114.7	-9.7	154.0	21.3
Весь Водосбор					
N, т/год	10615.7	9245.3	-12.9	12410.0	16.9
P, т/год	572.2	454.7	-20.5	724.7	26.7

тельности на всей планете. Следовательно, и прогностическая оценка последствий климатических изменений будет промежуточной между оценками, сделанными в настоящей работе по двум экстремальным сценариям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании представленных результатов можно сделать вывод о том, что цель работы достигнута и поставленные задачи решены. Проведен сбор информации об основных источниках биогенной нагрузки на водосборе Онежского озера, а также данных натурных наблюдений Росгидромета и ИВПС КарНЦ РАН за поступлением азота и фосфора в озеро, которые использовались при калибровке модели формирования биогенной нагрузки и проведении последующих вычислений.

Выполнена оценка сельскохозяйственной нагрузки на озеро, а также возможного снижения нагрузки в результате внедрения НДТ в сельскохозяйственное производство. Согласно расчетам по модели ILLM, нагрузка на озеро со всего водосбора в 2021 г. составляла 572.2 тР/год и 10615.7 тN/год. При этом снижение нагрузки на озеро при условии внедрения НДТ в сельскохозяйственное производство на водосборе может составить <0.01% от объема выноса в 2021 г. как по N, так и по P. Наиболее значимый вклад в снижение нагрузки на озеро за счет внедрения сельскохозяйственных НДТ вносит водосбор р. Шуи – 1.6 т/год (0.08%) по $N_{\text{общ}}$ и 0.1 т/год (0.08%) по $P_{\text{общ}}$. В такой ситуации можно утверждать, что возможные изменения сельскохозяйственной нагрузки за счет внедрения НДТ едва ли окажут существенное влияние на экологическое состояние Онежского озера. Тем не менее внедрение НДТ в сельское хозяйство региона, особенно в южной его части, – эффективное средство оздоровления малых рек и водоемов, расположенных вблизи сельхозугодий.

Проведены расчеты возможного увеличения поступления N и P с водосбора и его подбассейнов в озеро к 2050 г. при сохранении темпов роста рыбоводства на водных объектах водосбора. Показано, что в этом случае можно ожидать возрастания биогенной нагрузки на озеро на 3.9% по P и на 1.9% по N по сравнению с 2021 г. Из всех под-

бассейнов наиболее значимое увеличение выноса биогенных элементов может быть характерно для Заонежья – 11.2% по P и 10.6% по N.

Дана оценка возможного изменения поступления N и P в озеро к концу XXI в. из-за изменения стока с водосбора согласно двум сценариям – RCP 2.6 (лучший с точки зрения влияния на окружающую среду) и RCP 8.5 (худший). Сценарий RCP 2.6 может привести к снижению биогенной нагрузки на озеро из-за снижения стока, на водосборе Онежского озера снижение может составить 12.9% по N и 20.5% P. При неблагоприятном сценарии RCP 8.5 возможны увеличение стока и соответствующий рост выноса N на 16.9% и P на 26.7%. В реальности изменение климата произойдет по промежуточному сценарию, и соответствующие изменения биогенного выноса будут также промежуточными.

СПИСОК ЛИТАРАТУРЫ

1. 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.
2. ГОСТ Р 56828.15-2016 “Наилучшие доступные технологии. Термины и определения.
3. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. РСФСР. Вып. 7. Бассейны рек Балтийского моря, Онежского и Ладожского озер. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 220 с.
4. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2019 году. Петрозаводск, 2020. 248 с.
5. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 году. Петрозаводск, 2021. 277 с.
6. Китаев С.П., Ильмаст Н.В., Стелигова О.П. Методы оценки биогенной нагрузки от форелевых ферм на водные экосистемы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 38 с.
7. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Воздействие будущих климатических изменений на сток с водосбора Онежского озера // Тр. КарНЦ РАН. 2022. № 6. С. 41–49.

8. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.
9. Лозовик П.А., Бородулина Г.С., Карпечко Ю.В., Кондратьев С.А., Литвиненко А.В., Литвинова И.А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. 2016. № 5. С. 35–52.
10. Поздняков Ш.Р., Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Игнатьева Н.В., Шмакова М.В., Минакова Е.А., Расулова А.М., Обломкова Н.С., Васильев Э.В., Терехов А.В. Перспективы сокращения выноса биогенных элементов с речных водосборов за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) сельскохозяйственного производства (по результатам моделирования) // Вод. ресурсы. 2020. № 5. С. 588–602.
11. Сабылина А.В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965–2008 годах // Тр. КарНЦ РАН. 2016. № 9. С. 68–77.
12. Applied methodology for the PLC-6 assessment // Baltic Marine Environment Protection Commission / Ed. Lars M. Svendsen. Finland: HELCOM, 2019. 59 p.
13. Buchhorn M., Lesiv M., Tsendbazar N.-E. et al. Copernicus Global Land Cover Layers-Collection 2. Remote Sensing 2020. V. 12. № 108. P. 1044. <https://doi.org/10.3390/rs12061044>
14. Tsendbazar N.E., Tarko A., Linlin L. et al. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100 m. Version 3. Globe 2015–2019. Validation Rep. Zenodo, Geneva, Switzerland, 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3938974>
15. Vuuren D.P., Jae K., Kainuma M. et al. The representative concentration pathways: an overview // Climatic Change. 2011. V. 109. P. 5–31.
16. Guidelines for the annual and periodical compilation and reporting of waterborne pollution inputs to the Baltic Sea (PLC-Water). Helsinki: HELCOM Publ., 2015. 143 p.
17. Helcom Baltic Sea Action Plan. Helsinki: Helsinki Commission Publ., 2007. 103 p.
18. Land Cover Classification System (LCCS). Version 2. Classification Concepts and User Manual / Ed. A. Di Gregorio. № 8. Rome: FAO Environ. Natural Resour. Service Ser., 2005. 208 p.
19. Meinshausen M. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // Climatic Change. 2011. V. 109. P. 213–241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
20. Moss R.H. The next generation of scenarios for climate change research and assessment // Nature. 2010. V. 463. P. 747–756.
21. Nakicenovic N., Swart R. IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge: Cambridge Univ. Press., 2000. 129 p.
22. Rogelj J., Meinshausen M., Knutti R. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates // Nature Clim. Change. 2012. № 2. P. 248–253.
23. Wayne G.P. The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways // Skeptical Sci. 2013. August. 24 p.