

АБИОТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОЗЕРА НЕРО ПО ДАННЫМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. 1. БИОГЕННАЯ НАГРУЗКА С ВОДОСБОРА

Ш. Р. Поздняков, С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова

Институт озераведения РАН,

196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9, e-mail: tbgmaster@mail.ru

Поступила в редакцию 5.08.2020

В работе решается задача по оценке биогенной нагрузки на оз. Неро со стороны водосбора, характеризующегося пространственной неоднородностью поверхности и минимальным объемом данных натурных наблюдений. Оценка биогенной нагрузки с территории водосбора оз. Неро проводилась по математической модели формирования биогенной нагрузки, разработанной в институте озераведения РАН. Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой внешней нагрузки на водоемы, сформированной точечными и рассредоточенными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений. 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 биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью. Получено, что нагрузка на акваторию с водосбора составляет 51.5 т P/г. и 585.5 т N/г., из которой 36.0 т P/г. (70% от общей нагрузки на озеро) и 176.5 т N/г. (30%) поступают непосредственно в озеро от прибрежных населенных пунктов. При условии подключения всего населения к очистным сооружениям и внедрения НДТ ведения сельского хозяйства, согласно проведенному численному эксперименту, нагрузка снизится на 23% для общего фосфора и на 19% для общего азота.

Ключевые слова: биогенная нагрузка, водоем, водосбор, моделирование.

DOI: 10.47021/0320-3557-2020-19-27

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Неро имеет огромное средообразующее, оздоровительное, рекреационное и градостроительное значение для г. Ростов, а также для всей Ярославской области. При этом в акватории водоема фиксируются возрастание концентраций азота и фосфора, ухудшение органолептических свойств и качественных характеристик водных ресурсов сопряженное с этим увеличение количественных характеристик фитопланктона озера. Значимо увеличился вклад синезеленых водорослей за счет возрастания биомассы планктотрихетового комплекса по “катастрофическому” типу и многие другие негативные процессы [Бабаназарова и др., 2011 (Babanazarova, 2011)]. По данным [Отчет..., 2011 (Otchet..., 2011)] установлено, что оз. Неро приблизилось к конечной стадии олиготрофно-эвтрофной сукцессии водных экосистем – стадии гипертрофного водоема.

До сих пор формированию биогенной нагрузки на оз. Неро с водосборной территории, являющейся одной из основных причин ухудшения экологического состояния водоема, уделялось мало внимания, так как внутренняя нагрузка на изучаемом объекте существенно превосходит внешнюю. Тем не менее, внешняя нагрузка – источник поступления азота, фосфора и других химических элементов в озеро извне, который медленно, но постоянно пополняет их запас в воде и донных отложениях.

Снижение внешней нагрузки – безальтернативный метод снижения темпов антропогенного эвтрофирования озера, так как возможности реального воздействия, направленного на снижение внутренней нагрузки на значительной площади, крайне ограничены.

Водосборная территория оз. Неро (створ – исток р. Вексы) составляет 1046 км², включая 54.4 км² акватории самого озера (рис. 1). Водосбор основного притока р. Сары занимает 723.8 км², то есть 61% площади указанной территории [Бикбулатов и др., 2003 (Bikbulatov et al., 2003); Состояние..., 2008 (Sostoyanie..., 2008)]. На всем протяжении озеро бурно зарастает водной растительностью, которая, ежегодно отмирая и оседая на дно, способствует обмелению озера. Также на обмеление озера влияют и наносы, поступающие в озеро с притоками. Наиболее интенсивно озеро зарастает в южной части. В среднем относительная площадь, покрытая макрофитами, находится в пределах 20–25% от общей площади озера. Водная растительность в общем виде представлена гелофитами, гидрофитами с плавающими листьями и погруженными гидрофитами [Бикбулатов и др., 2003 (Bikbulatov et al., 2003)].

Исследуемая территория относится к Русской равнине Европейской части России. В орографическом отношении район располагается, в основном, в пределах грядово-

холмистого и холмистого конечно-моренного рельефа; в котловине оз. Неро и по рекам – озерные и речные террасы, в северной и восточной частях выделяются слаборасчлененная пологоволнистая зандровая равнина. Абсолютные отметки поверхности от 93 м (урез оз. Неро) до 189 м (отдельные холмы).

Цель настоящего исследования – количественная оценка внешней нагрузки азотом и фосфором на оз. Неро со стороны водосборного бассейна в современных условиях.

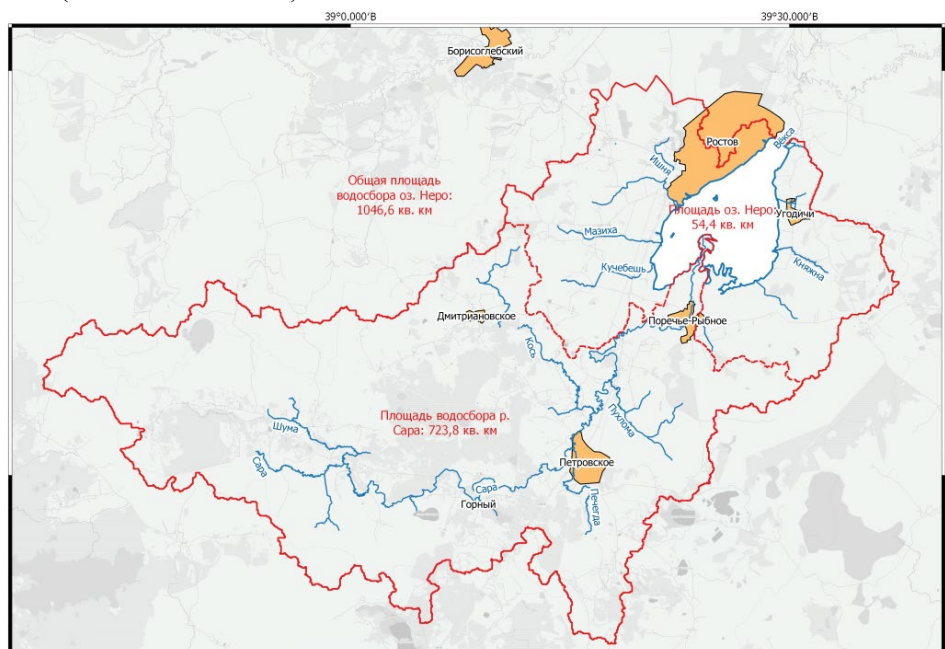


Рис. 1. Схема водосбора оз. Неро.

Fig. 1. Scheme of the catchment area of Lake Nero.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка биогенной нагрузки с территории водосбора оз. Неро проводилась по математической модели формирования биогенной нагрузки *IL_LM* – *Institute of Limnology Load Model* (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612519 от 27.02.2014). Разработка модели выполнялась на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования стока и выноса химических веществ с водосборных территорий, поступления растворенных примесей в водоемы [Кондратьев, 2007 (Kondratyev, 2007); Vink, Behrendt, 2002; Venohl et al., 2005; Behrendt, Dannowski, 2007], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [Guidelines..., 2015]. Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой внешней нагрузки на водоемы, сформированной точечными и рассредоточенными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений. 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 биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью.

Расчеты выноса химических элементов с водосбора и формирования внешней нагрузки на водные объекты могут выполняться как с годовым так и с месячным шагами по времени. Однако из-за того, что большая часть входных данных, получаемая из материалов государственной статистической отчетности, имеет годовое среднее, вариант модели *IL_LM* с шагом расчета в 1 год получил большее распространение.

В связи с актуальностью проблемы сдерживания эвтрофирования водных объектов при разработке модели основное внимание уделялось расчету биогенной нагрузки общим фосфором и общим азотом. В тоже время модель позволяет выполнять расчеты выноса некоторых растворенных металлов с речных водосборов [Кондратьев и др., 2010 (Kondratyev et al., 2010)].

В последней версии модели для оценки биогенной нагрузки, сформированной на сельскохозяйственных угодьях, используется метод, предложенный специалистами Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – ИАЭП

[Брюханов и др., 2016 (Brukhanov et al., 2016); Поздняков и др., 2016 (Pozdnyakov et al., 2016)].

Модель ориентирована на существующие ограниченные возможности информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов Росгидромета, а также структур государственной статистической отчетности о сбросах сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах РФ. Необходимое условие практического применения модели на реальных объектах – наличие информации об основных источниках нагрузки

на рассматриваемые водосборы. При этом контролируемые системой Росгидромета водосборы могут являться объектом верификации модели. Конечным итогом моделирования является количественная оценка внешней нагрузки на водоем или водоток со стороны водосбора и отдельных ее составляющих.

Общая структура разработанной модели, рассчитывающей вынос химических веществ с водосбора и нагрузку на водные объекты (реки, озера, водохранилища), приведена на рис. 2.



Рис. 2. Схема модели IL_LM.

Fig 2. Scheme of the IL_LM model.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На момент выполнения расчетов (2017 г.) никаких регулярных гидрологических и гидрохимических наблюдений на водосборе оз. Неро не велось. Кроме того, по данным официальной статистики 2ТП (водхоз) на рассматриваемом объекте не было источников, сбрасывающих сточные воды, содержащие фосфор. Это при том, что на водосборе находится г. Ростов и ряд крупных сельских поселений. В сложившейся ситуации математическое моделирование – единственный доступный инструмент оценки выноса биогенных веществ с различных типов поверхности водосбора и формирования суммарной внешней нагрузки на озеро. Основное внимание при моделировании уделялось выносу азота и фосфора со следующих типов подстилающей поверхности (табл. 1):

- территории, незатронутые хозяйственной деятельностью;

- территории, ранее подвергавшиеся антропогенному воздействию;

- сельскохозяйственные площади;

- площади населенных пунктов, не имеющих подключения к очистным сооружениям.

Особого внимания заслуживает расчет нагрузки с сельскохозяйственных угодий, выполненный сотрудниками ИАЭП [Кондратьев и др., 2018 (Kondratyev et al., 2018)]. Водосбор оз. Неро расположен на территории трех районов Ярославской области: Борисоглебского, Ростовского и Переславского, где ведется сельскохозяйственная деятельность в виде функционирования сельскохозяйственных организаций, крестьянско-фермерских и личных подсобных хозяйств. Указанные районы занимают площадь 6953 км², из которой около 16% (1128 км²) относится к водосборному бассейну оз. Неро.

Таблица 1. Площади различных типов поверхности водосбора оз. Неро по результатам автоматизированной классификации спутниковых изображений**Table 1.** Areas of different types of surface of Lake Nero catchment based on the results of automated classification of satellite images

Тип подстилающей поверхности / Subsoil type	S, км ²	Доля в площади водосбора, % Share in catchment area, %
Урбанизированные территории, свалки, карьеры, заброшенные земли	47.2	4.8
Водно-болотные угодья	58.8	5.9
Леса	409.7	41.3
Сельскохозяйственные угодья, луга	476.5	48.0
Всего	992.2	100

Сельскохозяйственная деятельность ведется только на 10.8% территории водосборного бассейна, общая площадь возделываемых сельскохозяйственных земель в водосборе составляет 12254.5 га [<http://ab-centre.ru/>, <http://www.gks.ru>]. Основным направлением сельскохозяйственного производства является ведение молочного скотоводства, выращивание кормовых культур, картофеля, многолетних и однолетних трав, зерновых культур. Выращивание свиней, сельскохозяйственной птицы, овец и коз, лошадей осуществляется только в небольших крестьянско-фермерских и подсобных хозяйствах. Всего на территории водосбора функционирует около 50 сельскохо-

зяйственных организации и крестьянско-фермерских хозяйств. Основными факторами для оценки биогенной нагрузки на водные объекты от сельскохозяйственных предприятий являются показатели использования минеральных и органических удобрений (табл. 2). При этом важно учитывать типы используемых удобрений, концентрацию питательных элементов и технологии их применения. При работе с органическими удобрениями большое значение на вынос питательных веществ оказывает порядок соблюдения технологических регламентов [Брюханов и др., 2014 (Brukhanov et al., 2014)].

Таблица 2. Содержание N и P в органических удобрениях и внесение в составе органических и минеральных удобрений в границах водосбора оз. Неро (2016 г.)**Table 2.** Content of N and P in organic fertilizers and application of organic and mineral fertilizers within the catchment area of Lake Nero (2016)

Муниципальный район Municipal District	Органические удобрения Organic fertilizers				Минеральные удобрения Mineral fertilizers	
	N _{общ} , т/г.	P _{общ} , т/г.	N _{общ} , кг/га	P _{общ} , кг/га	N _{общ} , кг/га	P _{общ} , кг/га
Борисоглебский	43.1	7.8	61.2	11.0	7.5	3.7
Ростовский	688.9	124.3	61.5	11.1	9.3	4.6
Переславский	28.7	5.2	84.1	15.2	0.3	0.1

Образование и использование органических удобрений определяется путем нормативного расчета выхода навоза и помета при содержании сельскохозяйственных животных, с учетом современных систем содержания и технологий навозоудаления. При расчете использовался РД-АПК 1.10.15.02-08, разработанный в ФГБНУ ИАЭП [Брюханов и др., 2012; 2014; 2016 (Brukhanov et al., 2012; 2014; 2016); РД-АПК, 2008 (MD-APC, 2008)]. В табл. 3 представлены данные по поголовью сельскохозяйственных животных и годовому образованию навоза и помета, которые используются в качестве органических удобрений. Результаты расчетов сосредоточенной биогенной нагрузки при ведении сельскохозяйственной деятельности в границах водосбора оз. Неро, представлены в табл. 4.

Согласно результатам расчета годовая рассредоточенная нагрузка на водные объекты от сельскохозяйственной деятельности в границах водосбора оз. Неро составляет $N_{\text{общ}} - 331.71$ т/г. и $P_{\text{общ}} - 21.54$ т/г. При условии освоения НДТ использования питательных элементов в сельскохозяйственном производстве годовое поступление в водные объекты несколько сократится и составит $N_{\text{общ}} - 312.76$ т/г. и $P_{\text{общ}} - 20.74$ т/г.

Для урбанизированных территорий расчет сформированной на них нагрузки выполнялся исходя из численности проживающего населения. Характерной особенностью процесса оценки биогенной нагрузки на оз. Неро является отсутствие достоверной информации о сбросах сточных вод точечными источниками загрязнения. Так, по сведениям Департамента охраны окружающей среды и природопользо-

вания Ярославской области ни одно из предприятий, расположенных на водосборе оз. Неро, включая очистные сооружения, в последнее время не предоставляло в органы статистической отчетности сведений о сбросах фосфора со сточными водами в само озеро или в водные объекты его водосбора. Поэтому для оценки нагрузки использовалась информация о численности проживающего на водосборе населения на 26.10.2015 [<http://www.stat-data.ru/naselenie/yaroslavskoi-oblasti>]. Как отмечалось выше, в материалах ХЕЛКОМ [Guidelines..., 2005] расчет биогенной нагрузки $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ на муниципальные очистные сооружения предлагается проводить при следующих значениях нагрузки от одного жителя: 0.9 кг P /г. и 4.4 кг N /г. При этом механическая очистка не сказывается на содержании биогенных элементов в сточных водах, а биологическая очистка

муниципальных сточных вод приводит к снижению концентрации $P_{\text{общ}}$ на 30%, $N_{\text{общ}}$ – на 50% [Временные..., 1988 (Vremennye..., 1988)]. Результаты оценки биогенной нагрузки, сформированной жителями основных населенных пунктов водосбора оз. Неро, как при наличии очистных сооружений, так и при их отсутствии, представлены в табл. 5.

Нагрузка, сформированная населением г. Ростова и сельских поселений Ишня и Поречье-Рыбное, считалась поступающей непосредственно в озеро, а нагрузка от сельского поселения Петровское – на водосбор. Расчеты показали, что в результате жизнедеятельности населения на водосборе оз. Неро образуется 46.1 т P /г. и 2225.8 т N /г. При гипотетическом подключении всего населения к очистным сооружениям нагрузка снизится до 32.4 т P /г. и 112.9 т N /г.

Таблица 3. поголовье сельскохозяйственных животных и образование навоза в границах водосбора оз. Неро (2016 г.). КРС – крупный рогатый скот, СВ – свиньи, П – птица, Л – лошади, ОиК – овцы и козы

Table 3. Livestock animals and manure formation the catchment area of Lake Nero (2016). КРС – cattle, СВ – pigs, П – poultry, Л – horses, ОиК – sheep and goats

Муниципальный район Municipal District	КРС, гол	СВ, гол	П, гол	Л, гол	ОиК, гол	Образование навоза/помета, т/г.
Борисоглебский	346	5	3078	0	46	9225
Ростовский	5532	85	49255	7	740	147598
Переславский	231	4	2052	0	31	6150
Итого	6108	94	54385	8	817	162972

Таблица 4. Рассредоточенная нагрузка N и P на водные объекты в границах водосбора оз. Неро в современных условиях (2016 г.) и после внедрения в практику наилучших доступных технологий (НДТ) ведения сельского хозяйства

Table 4. Nonpoint load of N and P on water bodies within the catchment area of Lake Nero in modern conditions (2016) and after the implementation of the best available technologies (BAT) in agriculture

Муниципальный район Municipal District	$N_{\text{общ}}$, кг/га	$P_{\text{общ}}$, кг/га	$N_{\text{общ}}$, т/г.	$P_{\text{общ}}$, т/г.	НДТ, $N_{\text{общ}}$, т/г.	НДТ, $P_{\text{общ}}$, т/г.
Борисоглебский	20.94	1.36	14.74	0.96	13.95	0.93
Ростовский	28.06	1.82	314.59	20.43	296.56	19.67
Переславский	6.99	0.45	2.38	0.15	2.25	0.15
Итого	—	—	331.71	21.54	312.76	20.74

Таблица 5. Биогенная нагрузка (т/г.), сформированная населением без очистных сооружений и с учетом возможной очистки сточных вод

Table 5. Nutrient load (t/year) formed by the population without treatment facilities and taking into account the possible wastewater treatment

Муниципальное образование Settlement name	Население, чел.	P без очистки	P с очисткой	N без очистки	N с очисткой
Городское поселение Ростов	30824	27.7	19.4	135.6	67.8
Сельское поселение Ишня	7247	6.5	4.6	31.9	15.9
Сельское поселение Поречье-Рыбное	2051	1.8	1.3	9.0	4.5
Сумма		36.0	25.3	176.5	88.2
Сельское поселение Петровское	11209	10.1	7.1	49.3	24.7

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЯ

Расчет биогенной нагрузки на оз. Неро со стороны водосбора выполнялся для среднего многолетнего слоя стока, составляющего 220 мм/г. В соответствии с результатами выполненных ранее исследований [Кондратьев, Шмакова, 2019 (Kondratyev, Shmakova, 2019)] значения концентраций общего фосфора в почвенных водах и первичных звеньях гидрографической сети для различных типов поверхности принимались приближенно равными 0.05 мг P/л и 0.7 мг N/л для естественных территорий (лесов и болот), 0.08 мг P/л и 3.1 мг N/л для полей и лугов, не задействованных в настоящее время в сельскохозяйственном производстве, и 0.20 мг P/л и 2.3 мг N/л для заброшенных земель.

Результаты расчетов биогенной нагрузки на оз. Неро со стороны водосбора с использованием модели *IL_LM* совместно с методом оценки сельскохозяйственной нагрузки ИАЭП

Таблица 6. Результаты расчета формирования биогенной нагрузки (т/год) на оз. Неро для средней водности ($y = 230$ мм/г.) в современных условиях

Показатели / Indicators	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$
Суммарная нагрузка на гидрографическую сеть водосбора	49.2	709.0
Удержание водосбором и его гидрографической сетью	33.7	300.0
Прямой сброс в озеро	36.0	176.5
Нагрузка на озеро	51.5	585.5
Фоновая (природная) составляющая нагрузки	5.0	88.1

Таблица 7. Результаты расчета формирования биогенной нагрузки (т/г.) на оз. Неро для средней водности ($y = 230$ мм/г.) при гипотетическом подключении всего населения к очистным сооружениям и внедрении наилучших доступных технологий (НДТ) в сельское хозяйство

Table 7. The results of calculating the nutrient load (t/year) on the Lake Nero for average runoff ($y = 230$ mm/year) with hypothetical connection of the entire population to treatment facilities and implementation of the best available technologies (BAT) in agriculture

Показатели / Indicators	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$
Суммарная нагрузка на гидрографическую сеть водосбора	45.4	665.5
Удержание водосбором и его гидрографической сетью	31.1	281.6
Прямой сброс в озеро	25.3	88.2
Нагрузка на озеро	39.6	472.1
Фоновая (природная) составляющая нагрузки	5.0	88.1

Полученные результаты представляют собой приближенную оценку биогенной нагрузки на оз. Неро, так как для их получения использован ряд достаточно серьезных предположений по преодолению дефицита исходной информации. Кроме того, погрешность изменения имеющихся входных величин и параметров весьма велика. Тем не менее, по мнению авторов работы, порядок величины рассчитанной нагрузки и соотношение между ее составляющими вызывают доверие. Един-

для года средней водности со слоем стока 220 мм/г. ($7 \text{ л}/(\text{км}^2 \cdot \text{с})$) приведены в табл. 6.

Из представленных расчетных материалов следует, что в условиях средней водности на поверхность изучаемого водосбора поступает 49.2 т P/г. и 709.0 т N/г. Водосбором и его гидрографической сетью удерживается 33.7 т P/г. и 300.0 т N/г. Нагрузка на акваторию с водосбора составляет 51.5 т P/г. и 585.5 т N/г., из которой 36.0 т P/г. (70% от общей нагрузки на озеро) и 176.5 т N/г. (30%) поступают непосредственно в озеро от прибрежных населенных пунктов. Фоновая или природная нагрузка – 5.0 т P/г. и 88.1 т N/г. Гипотетическое подключение всего населения к очистным сооружениям и внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) в сельскохозяйственное производство, проиллюстрированные табл. 7, позволяют снизить фосфорную нагрузку на 23% до 39.6 т P/г. и азотную на 19% до 472.1 т N/г.

ственный обнаруженный в литературе пример оценки биогенной нагрузки на оз. Неро [Бикбулатов и др., 2003 (Bikbulatov et al., 2003)] содержит информацию о том, что вынос фосфора с водосбора р. Сара в 1989 г. оценивался в 12.7 т/г. Этот результат достаточно хорошо согласуется с приведенными выше данными, из которых следует, что для условий 2016–2017 гг. нагрузка с территории всего водосбора без учета прямых сбросов оценивается в 15.5 т P/г.

Кроме впервые выполненной оценки биогенной нагрузки на оз. Неро со стороны водосбора, а также вклада в нагрузку отдельных ее составляющих, важным результатом настоящего исследования является понимание важности оценки структуры подстилающей поверхности и биогенной эмиссии с различных типов поверхности при решении такого рода задач. Прогресс в развитии моделирования формирования биогенной нагрузки на водные объекты, учитывающего реальную структуру поверхности водосбора, в значительной степе-

ни связан проведением широкомасштабных полевых исследований по оценке коэффициентов эмиссии фосфора, азота и других химических веществ с различных ландшафтных структур в различных физико-географических условиях. Кроме того, использование данных дистанционного зондирования в сочетании с современными ГИС – технологиями существенно облегчает сбор и использование при моделировании данных о пространственной неоднородности изучаемых объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выполнена оценка биогенной нагрузки общим фосфором и азотом на оз. Неро со стороны его водосборной площади. Получено, что нагрузка на акваторию с водосбора составляет 51.5 т P/г. и 585.5 т N/г., из которой 36.0 т P/г. (70% от общей нагрузки на озеро) и 176.5 т N/г. (30%) поступают непосредственно в озеро от прибрежных населен-

ных пунктов. При условии подключения всего населения к очистным сооружениям и внедрения НДТ ведения сельского хозяйства, согласно проведенному численному эксперименту, нагрузка снизится на 23% для общего фосфора и на 19% для общего азота и составит соответственно 39.6 т P/г. и 472.1 т N/г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабаназарова О.В., Кармайер Р., Сиделев С.И., Александрова Е.М., Сахарова Е.Г. Структура фитопланктона и содержание микроцистинов в высокоэвтрофном озере Неро // Водные ресурсы, 2011. Т. 38 № 2. С. 223–231.
- Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С., Поддубный С.А. Гидрология и гидрохимия озера Неро. Рыбинск: Изд-во ОАО “Рыбинский дом печати”. 2003. 192 с.
- 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: СЗНИИМЭСХ. 2012. 53 с.
- 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.
- Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Методика укрупненной оценки суточного и годового выхода навоза/помета // Молочнохозяйственный вестник. 2014. № 1 (13). С. 78–85.
- Временные методические рекомендации по прогнозированию химического состава поверхностных вод с учетом перераспределения стока. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 56 с.
- Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука. 2007. 253 с.
- Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю. Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). СПб: Нестор-История. 2010. 116 с.
- Кондратьев С.А., Брюханов А.Ю., Терехов А.В. Структура поверхности водосбора как определяющий фактор биогенной нагрузки на водоем (по данным математического моделирования) // Вопросы географии. 2018. Вып. 145. С. 89–108.
- Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб: Нестор-История, 2019. 248 с.
- Отчет о научно-исследовательской работе “Оценка современного состояния озера Неро в Ростовском муниципальном округе Ярославской области” (заключительный). Ярославский государственный университет им. Демидова, Ярославль, 2011. 45 с.
- 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 // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология. География. 2016. Вып. 4. С. 53–65.
- РД-АПК 1.10.15.02-2008 Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета. М.: Минсельхоз РФ. 2008.
- Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века. Под ред. Лазарева В.И. М.: Наука. 2008. 406 с.
- Behrendt H., Dannowski R. Nutrients and heavy metals in the Odra River system. Germany: Weissensee Verlag Publ. 2007. 337 p.
- Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). Helsinki, Finland: HELCOM Publ. 2005. 80 p.

- 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 & Technology*. 2005. Vol. 51 (3–4). P. 19–29.
- 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, № 16. P. 3227–3244.
- <http://ab-centre.ru/>
- <http://www.gks.ru>
- <http://www.statdata.ru/naselenie/yaroslavskoi-oblasti>

REFERENCES

- Babanazarova O.V., Karmajer R., Sidelev S.I., Aleksandrina E.M., Saharova E.G. Struktura fitoplanktona i sodержanie mikrocinov v vysokoevtrifnom ozere Nero [Phytoplankton structure and microcystin content in highly eutrophic lake Nero]. *Vodnyie resursy*, 2011, vol. 38, no 2, pp. 223–231. (In Russian)
- Behrendt H., Dannowski R. *Nutrients and heavy metals in the Odra River system*. Germany, Weissensee Verlag Publ. 2007. 337 p.
- Bikbulatov E.S., Bikbulatova E.M., Litvinov A.S., Poddubnyj S.A. *Hydrology and hydrochemistry of Lake Nero*. Rybinsk: Izd-vo OAO “Rybinskij dom pečati”, 2003, 192 p. (In Russian)
- Bryuhanov A.Yu., Kondrat'ev S.A., Oblomkova N.S., Oguzdin A.S., Subbotin I.A. Metodika opredeleniya biogennoj nagruzki sel'skohozyajstvennogo proizvodstva na vodnye ob'ekty [Methodology for determining the biogenic load of agricultural production on water bodies]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*, 2016, no 89, pp. 175 – 183. (In Russian)
- Bryuhanov A.Yu., Maksimov D.A., Huhta H., Vasil'ev E.V., Minin V.B., Subbotin I.A. *Recommendations for the organization and conduct of industrial environmental control systems for processing and using manure (manure)*. The order of development of Technological regulations. SPb.: SZNIIMESKH, 2012, 53 p. (In Russian)
- Bryuhanov A.Yu., SHalavina E.V., Vasil'ev E.V. Metodika ukрупnennoj ocenki sutochnogo i godovogo vyhoda navoza/pometa [Method of integrated assessment of daily and annual manure/manure yield]. *Molochnohozyajstvennyj vestnik*, 2014, no 1 (13), pp. 78–85. (In Russian)
- Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water)*. Helsinki, Finland: HELCOM Publ., 2005, 80 p.
- Kondrat'ev S.A. *Formation of external load on water bodies: problems of modeling*. SPb.: Nauka, 2007. 253 p. (In Russian)
- Kondrat'ev S.A., Bryuhanov A.Yu., Terekhov A.V. Struktura poverhnosti vodosbora kak opredelyayushchij faktor biogennoj nagruzki na vodoem (po dannym matematicheskogo modelirovaniya) [Catchment surface structure as a determining factor of biogenic load on the reservoir (according to mathematical modeling data)]. *Voprosy geografii*, 2018, issue 145, pp. 89–108. (In Russian)
- Kondrat'ev S.A., Golosov S.D., Zverev I.S., Ryabchenko V.A., Dvornikov A.Yu. *Modeling of abiotic processes in the catchment-reservoir system (on the example of lake Peipus)*. SPb.: Nestor-Istoriya, 2010. 116 p. (In Russian)
- Kondrat'ev S.A., Shmakova M.V. *Mathematical modeling of mass transfer in the catchment – watercourse – reservoir system*. SPb.: Nestor-Istoriya, 2019. 248 p. (In Russian)
- MD-APK 1.10.15.02-2008 *Guidelines for the technological design of systems for the removal and preparation for use of manure and manure*. M.: Minsel'hoz RF, 2008. (In Russian)
- Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote “Ocenka sovremennogo sostoyaniya ozera Nero v Rostovskom municipal'noi okruge Yaroslavskoj oblasti” (zaklyuchitel'nyj) [Report on the research work “Assessment of the current state of lake Nero in the Rostov municipal district of the Yaroslavl region” (final)]. Yaroslavl': Yaroslavskij gosudarstvennyj universitet im. Demidova, 2011, 45 p. (In Russian)
- Pozdnyakov Sh.R., Kondrat'ev S.A., Tarbaeva V.M., SHmakova M.V., Bryuhanov A.Yu., Vorob'yova E.A., Oblomkova N.S. Nauchnoe obosnovanie vypolneniya rekomendacij HELKOM po snizheniyu biogennoj nagruzki na Finskij zaliv so storony Rossii [Scientific justification for the implementation of HELCOM recommendations to reduce the biogenic load on the Gulf of Finland from Russia]. *Vestnik SPbGU, Ser. 7. Geologiya. Geografiya*, 2016, issue 4, pp. 53–65. (In Russian)
- Sostoyanie ekosistemy ozera Nero v nachale XXI veka* [State of the lake Nero ecosystem at the beginning of the XXI century]. M., Nauka, 2008. 406 p. (In Russian)
- 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 & Technology*, 2005, vol. 51 (3–4), pp. 19–29.
- 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, no. 16, pp. 3227–3244.
- Vremennye metodicheskie rekomendacii po prognozirovaniyu himicheskogo sostava poverhnostnyh vod s uchetom pereraspredeleniya stoka* [Temporary guidelines for predicting the chemical composition of surface waters, taking into account the redistribution of runoff]. L.: Gidrometeoizdat, 1988. 56 p. (In Russian)
- <http://ab-centre.ru/>
- <http://www.gks.ru>
- <http://www.statdata.ru/naselenie/yaroslavskoi-oblasti>

ABIOTIC FACTORS AFFECTING THE ECOLOGICAL STATE OF LAKE NERO ACCORDING TO MATHEMATICAL MODELING. 1. NUTRIENT LOAD FROM THE CATCHMENT AREA

Sh. R. Pozdnyakov, S. A. Kondratyev, M. V. Shmakova

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences

196105, Sevastyanova str., 9, Saint Petersburg, e-mail: tbgmaster@mail.ru

Reducing the external load is an uncontested method of reducing the rate of anthropogenic eutrophication of the lake, since the possibilities of real impact aimed at reducing the internal load over a large area are extremely limited. The purpose of this study is a quantitative assessment of the external load of nitrogen and phosphorus on Lake Nero from the drainage basin in modern conditions. The assessment of the nutrient load from the drainage area of Lake Nero was carried out according to the mathematical model of the formation of the nutrient load, developed at the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences. The model is designed to solve problems related to the quantitative assessment of the external load on water bodies, formed by point and nonpoint sources of pollution, forecast of its change under the influence of possible anthropogenic and climatic changes, taking into account the influence of hydrological factors and the retention of nutrients by the catchment and the hydrographic network. It was found that the load on the aquatic area from the catchment is 51.5 t P/year and 585.5 t N/year, of which 36.0 t P/year (70% of the total load on the lake) and 176.5 t N/year (30%) go directly to lake from coastal settlements. Provided that the entire population is connected to treatment facilities and the introduction of best available technologies (BAT) for agriculture, according to a numerical experiment, the load will decrease by 23% for total phosphorus and 19% for total nitrogen.

Keywords: nutrient load, reservoir, catchment area, modeling