

УДК 556.555.3 (282.247.211)

СОВРЕМЕННАЯ БИОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО ОТ КРУПНЕЙШИХ ЕГО ПРИТОКОВ

Н. Е. Галахина*, М. Б. Зобков

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*kulakovanata@mail.ru

Определена современная биогенная нагрузка на второе по величине пресноводное озеро Европы – Онежское – от крупнейших его притоков (рек Водла, Шуя и Суна). Речной сток играет важную роль в формировании химического состава воды Онежского озера. Исследование основано на данных по содержанию биогенных элементов ($P_{\text{мин}}$, $P_{\text{общ}}$, $N\text{-NH}_4$, $N\text{-NO}_2$, $N\text{-NO}_3$, $N_{\text{орг}}$, $N_{\text{общ}}$), полученных в разные сезоны 2001–2002, 2007–2008, 2015–2016 и 2021 гг. Азотная речная нагрузка формируется преимущественно за счет органических его форм (в среднем 78 % от $N_{\text{общ}}$). Повышенное поступление $P_{\text{мин}}$ отмечено с водами р. Шуи в 2021 г. (40 % от $P_{\text{общ}}$) и р. Суны (нижнее русло) в 2001–2002 и 2007–2008 гг. (72 и 61 % от $P_{\text{общ}}$ соответственно), что связано с изменением антропогенного воздействия. С водами р. Шуи в 2007–2008 гг., по сравнению с другими рассматриваемыми периодами, увеличился сток в озеро $P_{\text{мин}}$. Отмечено снижение стока минерального фосфора и аммонийного азота с водами нижнего русла р. Суны и увеличение фосфорной и нитратной нагрузки от Кондопожского канала.

Ключевые слова: река Шуя; река Водла; река Суна; антропогенное влияние

Для цитирования: Галахина Н. Е., Зобков М. Б. Современная биогенная нагрузка на Онежское озеро от крупнейших его притоков // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 53–61. doi: 10.17076/lim1925

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РНФ (№ 22-17-00193). Химические анализы воды проведены за счет средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

N. E. Galakhina*, M. B. Zobkov. CURRENT NUTRIENT LOAD ON LAKE ONEGO FROM ITS LARGEST TRIBUTARIES

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
(50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *kulakovanata@mail.ru

The current nutrient load on the second largest freshwater lake in Europe, Lake Onego, from its largest tributaries was determined (Vodla, Shuya and Suna rivers). Discharge from rivers plays an important role in the formation of the water chemical composition

of Lake Onego. The study is based on the nutrient content data (IP, TP, N-NH₄, N-NO₂, N-NO₃, TON, TN) collected in different seasons of 2001–2002, 2007–2008, 2015–2016 and 2021. River nitrogen load is mainly formed of organic forms (78 % of TN on average). Increased IP inflow arrived with the waters from the Shuya River in 2021 (40 % of TP inflow) and the lower reaches of the Suna River in 2001–2002 and 2007–2008 (72 and 61 % of TP inflow, respectively), as a result of changes in human impact. Inorganic phosphorus load from the Shuya River was elevated in 2007–2008 compared with other periods. Although the nutrient inflow from the Suna River has not generally changed over the study period, a decrease in IP and ammonium nitrogen inflow from its lower reaches and an increase in the phosphorus and nitrate load from the Kondopoga Canal were detected.

Keywords: Shuya River; Vodla River; Suna River; anthropogenic impact

For citation: Galakhina N. E., Zobkov M. B. Current nutrient load on Lake Onego from its largest tributaries. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 53–61. doi: 10.17076/lim1925

Funding. The study was supported by a Russian Science Foundation grant (# 22-17-00193). Water chemical analyses were financed from the federal budget through state assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS).

Введение

Речной биогенный сток является одним из основных факторов, определяющих биопродукционный потенциал водоема и влияющих на его трофический статус. В формировании химического состава воды Онежского озера, одного из крупнейших озер Европы, главная роль принадлежит речному стоку: в него впадает 1152 реки со среднемноголетним водным стоком 17,3 км³/год, или 72 % от общего стока в озеро [Крупнейшие..., 2015]. Притоки являются важным источником поступления в Онежское озеро биогенных элементов (72 % от общего стока P_{общ} и 68 % от общего стока N_{общ}) [Лозовик и др., 2016], а также Fe, Mn, Cu и Zn (83–97 % от общего стока по каждому компоненту отдельно) [Лозовик и др., 2020].

Сходство основных химических показателей притоков Онежского озера определяется близкими климатическими условиями, которые формируют их сток. Однако неоднородность геологического и геоморфологического строения бассейна озера, особенности его гидрографии обуславливают специфику гидрохимического и гидрологического режимов притоков. Бассейн Онежского озера расположен на двух крупных геологических формированиях: северная часть сложена кристаллическими породами Балтийского щита, южная часть находится на Русской платформе [Бискэ, 1959]. Наибольшее количество рек расположены в северо-западной части бассейна Онежского озера, а сток большинства крупных рек зарегулирован озерами [Гидрохимия..., 1973]. Для них характерно низкое содержание растворенных минеральных веществ

и высокая концентрация органического вещества и железа. Густота речной сети в юго-западной и южной частях бассейна существенно меньше, природная концентрация большинства химических компонентов в их водах в 2–3 раза выше по сравнению с реками северной части бассейна озера. К крупнейшим притокам Онежского озера относятся реки Шуя, Суна и Водла (рис. 1), на их бассейны приходится более половины водосборной территории водоема и около 60 % речного стока в озеро [Крупнейшие..., 2015]. Реки Шуя и Суна являются притоками северо-западного побережья, р. Водла – северо-восточного, при этом все три притока находятся на Балтийском щите, благодаря чему имеют сходный химический состав воды. Некоторые отличия в содержании органического вещества в р. Суне по сравнению с реками Шуя и Водла связаны с зарегулированностью ее стока [Сабылина, 2007].

Ежемесячные и сезонные гидрохимические исследования притоков Онежского озера начались в 1963–1965 годах [Гидрохимия..., 1973], затем они периодически проводились в 1986–1987 [Пирожкова, 1990], 2001–2002 [Сабылина, 2007] и 2007–2008 [Лозовик и др., 2016] годах. Анализ данных, полученных в эти временные периоды, свидетельствует о том, что вынос биогенных элементов с реками в озеро зависит от хозяйственной деятельности на водосборах. В середине 1960-х годов основным поставщиком биогенных элементов в Онежское озеро среди трех главных притоков была р. Водла [Гидрохимия..., 1973]. В конце 1970-х и начале 1980-х доминирующая роль в биогенной нагрузке стала принадлежать р. Шуе

в связи с активизацией сельскохозяйственной деятельности на ее водосборе. В этот период ее бассейн претерпел значительные ландшафтные изменения (сведение лесов, распашка и мелиорация), что дополнительно обогатило ее воды биогенными элементами [Пирожкова, 1990]. Согласно данным [Сабылина и др., 2010], в 2001–2002 и 2007–2008 гг. произошло снижение речной биогенной нагрузки в Онежское озеро по сравнению с более ранними периодами за счет уменьшения антропогенного воздействия на водосборах рек. Следует отметить, что речная биогенная нагрузка в эти периоды была рассчитана с использованием среднемноголетних расходов рек. Наличие ежемесячных данных расходов рек (данные Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

России) за изучаемые временные периоды позволило рассчитать фактический речной сток, использованный в настоящем исследовании.

На качество воды в Петрозаводской и Кондопожской губах Онежского озера существенное влияние оказывают реки Шуя и Суна [Galakhina et al., 2022], тогда как р. Водла впадает в открытую часть озера, вследствие чего может влиять на химический состав ее воды. В многолетнем плане наблюдается увеличение концентрации $P_{\text{общ}}$ в Кондопожской губе [Galakhina et al., 2022], что может быть связано с возрастанием биогенной нагрузки на водосборах притоков озера. С начала 2000-х годов в Республике Карелия активно развивается садковое форелеводство [Китаев и др., 2006], в том числе в бассейне Онежского озера, где расположена половина форелевых хозяйств региона

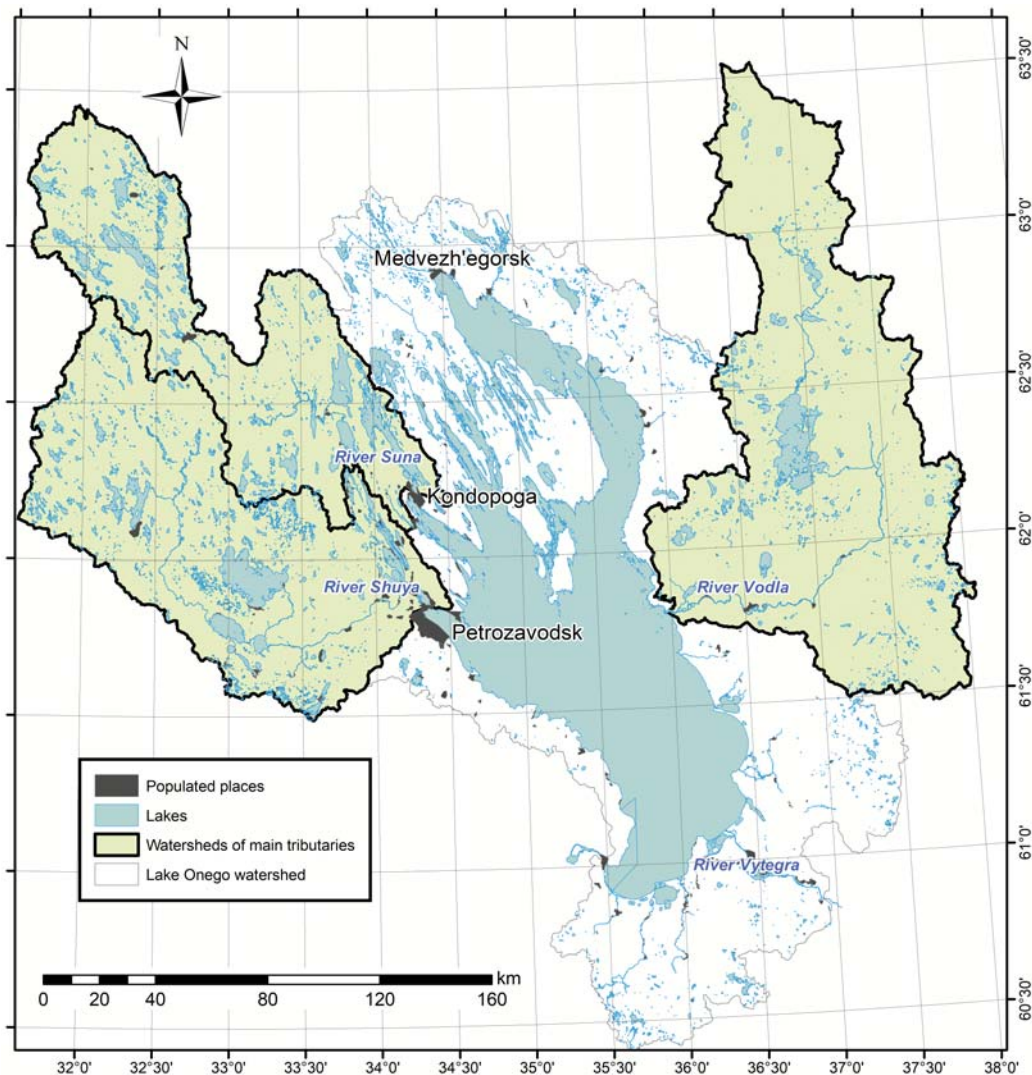


Рис. 1. Карта-схема водосборов основных притоков Онежского озера

Fig. 1. Schematic map of the catchment areas of the main Lake Onego tributaries

[Крупнейшие..., 2015]. По данным Ассоциации форелеводов Карелии [Карта..., 2023], на водосборную территорию р. Суны приходится около 50 % общего объема форели, выращиваемой на водосборе Онежского озера, тогда как на водосборе р. Шуи выращивается около 20 % от общего объема. Кроме того, очистные сооружения некоторых населенных пунктов, расположенных на водосборе основных притоков Онежского озера, работают неэффективно [Лозовик и др., 2016]. Все вышеперечисленное может отражаться на речной биогенной нагрузке на Онежское озеро.

Цель исследования – выявить изменения в речной биогенной нагрузке на Онежское озеро на основе сезонных данных по содержанию биогенных элементов (БЭ) в воде трех его основных притоков (рек Водла, Шуя и Суна) в современный период.

Исследование выполнено на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Материалы и методы

Объекты исследования

Водосборные территории исследованных рек отличаются размерами и озерностью (табл. 1). Река Водла имеет наибольшую водосборную территорию с низкой озерностью, тогда как площадь водосбора р. Суны наименьшая, а степень озерности высокая. Заболоченность водосборов этих двух рек близкая (табл. 1). Сток р. Суны был искусственно изменен в середине прошлого века. После строительства Гирвасской плотины и Суна-Пальеозерского канала основной сток реки направлен через озера Палье, Сандал и Нигозеро в Кондопожский канал, обеспечивающий Кондопожскую ГЭС. Русло р. Сандалки, связывавшей ранее р. Суну с оз. Сандал, было перекрыто

плотиной, озера Палье, Сандал и Сундозеро превращены в водохранилища [Гидрохимия..., 1973]. В связи с этим нижнее течение реки оказалось фактически изолированным от верхнего и стало представлять собой отдельную реку – нижнее русло р. Суны.

Бассейн р. Шуи является наиболее освоенным в экономическом плане, здесь сосредоточено более 10 % сельскохозяйственного производства Карелии [Атлас..., 2021]: два крупнейших животноводческих предприятия и примерно десяток форелеводческих хозяйств с объемом производства около 1,4 тыс. т рыбы в год. Кроме того, в р. Шуя поступают бытовые сточные воды населенных пунктов, и часть этих стоков не очищается. Освоенность водосборов рек Водла и Суна – слабая, на их берегах расположено несколько поселков, на водосборе р. Суны находятся форелевые хозяйства. В нижнем русле Суны с 2006 г. работала птицефабрика, с 2012 г. на ней происходило постепенное снижение объемов производства, и в настоящее время она закрыта. Река Водла берет свое начало из оз. Водлозеро, находящегося на территории Водлозерского национального парка.

Согласно имеющимся данным [Всероссийская..., 2002; Росстат, 2023], в период с 2002 по 2016 г. численность населения муниципальных районов, находящихся на водосборах исследованных рек, снизилась (рис. 2). Наибольшее сокращение (около 30 %) отмечено для водосбора р. Водлы, для рек Шуя и Суна изменения были менее значимыми.

Отбор проб воды и их химический анализ

Гидрохимические исследования в устьях рек Шуя, Водла и Суна (оба русла) выполнены в 2001 (весна, лето, осень) и 2002 (зима), в 2007 (весна, лето, осень) и 2008 (зима), в 2015 (лето, осень) и 2016 (зима, весна) годах, а в устье р. Шуи также в 2021 г. (все сезоны). Химический анализ проб воды включал определение

Таблица 1. Гидрологические характеристики крупнейших притоков Онежского озера [Сабылина, 2007; Крупнейшие..., 2015]

Table 1. Hydrological characteristics of the largest tributaries of Lake Onego [Sabylina, 2007; Filatov, 2015]

| Река River | Длина, км Length, km | Площадь водосбора, км ² Catchment area, km ² | Озерность, % Lake percentage, % | Заболоченность, % Swamp percentage, % |
|----------------|-------------------------|---|------------------------------------|--|
| Водла Vodla | 149 | 13 700 | 5,3 | 24 |
| Шуя Shuya | 194 | 10 100 | 10,6 | ~20 |
| Суна Suna | 280 | 6787 | 12,9 | 19 |

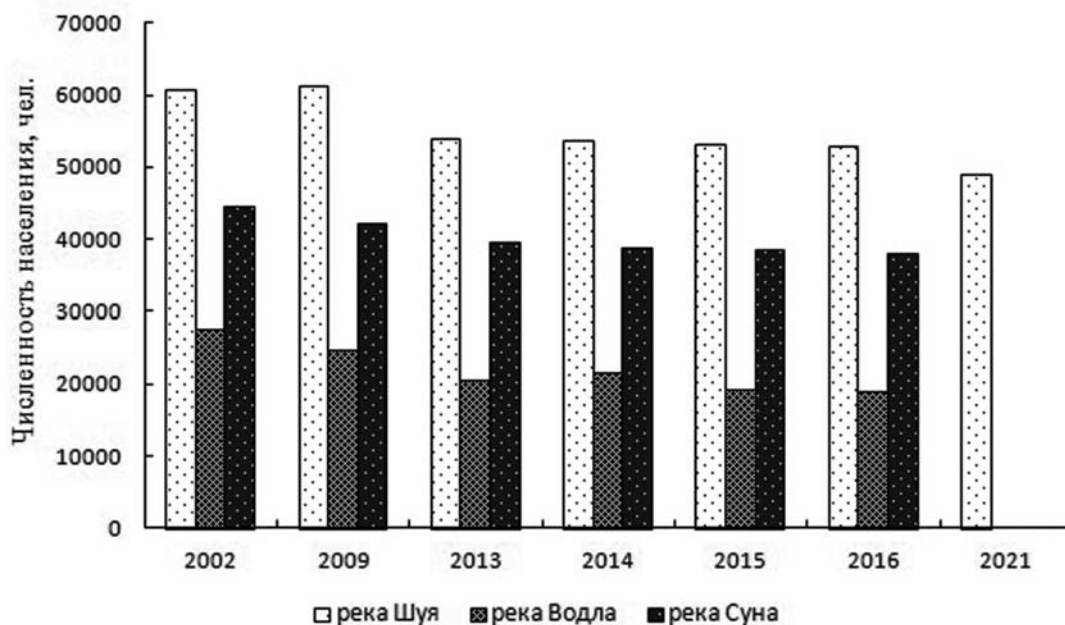


Рис. 2. Динамика численности населения на водосборных территориях крупнейших притоков Онежского озера [данные: Всероссийская..., 2002; Росстат..., 2023]

Fig. 2. Population dynamic in the catchment areas of the main Lake Onego tributaries [after: All-Russian population..., 2002; Rosstat..., 2023]

в них содержания биогенных элементов ($P_{\text{мин}}$, $P_{\text{общ}}$, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , $N_{\text{общ}}$) и выполнялся в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН. Формы азота и фосфора определяли спектрофотометрическим методом по стандартным методикам [Аналитические..., 2017]. Концентрацию $N_{\text{орг}}$ рассчитывали по разности между $N_{\text{общ}}$ и суммой неорганических его форм. Качество выполнения химических анализов подтверждено хорошей сходимостью данных в рамках международного лабораторного сличения ICP Waters [Escudero-Oñate, 2016].

Расчет биогенной нагрузки и статистический анализ данных

Расчет речной биогенной нагрузки (L_i) выполнен по средневзвешенному содержанию каждого компонента (C_i) и данным водного стока рек (Q_i , км³/год): $L_i = C_i Q_i$. Средневзвешенная концентрация рассчитывалась с использованием сезонной концентрации биогенных веществ и доли речного стока в каждый сезон. Данные о расходе рек получены от Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России (<https://gmvo.skniivh.ru/>). Различия в химическом составе воды каждой реки и биогенной нагрузке от каждой из них в разные периоды исследования оценивали с помощью U-критерия Манна – Уитни при помощи программного обеспечения SofaStatistics

(www.sofastatistics.com). Различия в общей биогенной нагрузке в разные периоды для каждой из исследованных рек проверены с помощью теста ANOVA. Во всех статистических тестах использовался уровень статистической значимости 0,05.

Результаты и обсуждение

Содержание биогенных элементов в воде основных притоков Онежского озера

Средневзвешенная концентрация большинства БЭ в воде исследованных притоков Онежского озера изменялась в широких пределах: $P_{\text{мин}}$ – 1–105 мкг/л, $P_{\text{общ}}$ – 11–146 мкг/л, NH_4^+ – 0,03–0,39 мг N/л, NO_2^- – 0,001–0,022 мг N/л, $N_{\text{общ}}$ – 0,52–1,19 мг/л (табл. 2). Минимальное содержание $P_{\text{общ}}$ наблюдалось в Кондопожском канале на протяжении всего периода исследований, тогда как максимальная его концентрация регистрировалась в нижнем течении р. Суны в 2001–2002 гг., после чего она постепенно снижалась (табл. 2). Повышенное содержание $P_{\text{общ}}$ отмечено в р. Водле в 2007–2008 гг. и в р. Шуе в 2021 г. В остальные периоды его концентрация в исследованных реках была близкой.

Содержание $P_{\text{мин}}$ в большинстве случаев не превышало 28 % от $P_{\text{общ}}$, за исключением р. Суны (нижнее русло) в 2001–2002 и 2007–2008 гг. и р. Шуи в 2021 г. (72, 57 и 41 % от $P_{\text{общ}}$

соответственно). Двукратное увеличение содержания $P_{\text{мин}}$ в воде р. Шуи в 2021 г. может быть связано с выходом из строя очистных сооружений п. Шуя, а также увеличением фосфорной нагрузки в связи функционированием в ее бассейне сельскохозяйственных предприятий, в том числе форелевых ферм. Высокая концентрация БЭ, в том числе $P_{\text{мин}}$, в 2001–2002 и 2007–2008 гг. в нижнем русле р. Суны связана с влиянием сточных вод птицеводческой фермы, объемы производства которой постепенно снижались с 2012 г., что впоследствии выразилось в уменьшении содержания БЭ в ее воде.

Среди форм азота в воде исследованных рек преобладали органические соединения (71–91 % от $N_{\text{общ}}$), что является характерной особенностью поверхностных вод Карелии [Лозовик, 2006]. В нижнем русле р. Суны в 2001–2002 гг. наблюдалось высокое, сопоставимое с $N_{\text{орг}}$, содержание минеральных форм азота (табл. 2), связанное с деятельностью птицефабрики. Близкое содержание нитратного и аммонийного азота также является природной особенностью рек Карелии [Лозовик, 2006], однако в ряде случаев в исследованных реках наблюдалось преобладание аммонийного азота над нитратами (табл. 2), что свидетельствует об антропогенном воздействии на них. Нитраты преобладали в Кондопожском канале в 2007–2008 и 2015–2016 гг., что, возможно, связано с протеканием реки через крупные глубоководные озера Сандал (средняя и максимальная глубины 9,7 и 58,0 м соответственно)

и Пальеозеро (18,0 и 74,0 м соответственно) [Озера..., 2013]. Высокое содержание нитратов является особенностью крупных глубоководных озер (Онежское озеро – 0,18 мг N/л [Galakhina et al., 2022], Байкал – 0,16 мг N/л [Khodzher et al., 2017], Верхнее и Мичиган – 0,32 и 0,17 мг N/л соответственно [Hobbs et al., 2016]). В глубоких стратифицированных озерах слой гипolimниона значительно превышает объем эпилимниона, аммонификация и нитрификация происходят преимущественно в гипolimнионе, а поступление образовавшихся нитратов в эпилимнион ограничено температурной стратификацией воды [Лозовик, 2006]. Содержание аммонийного и нитратного азота в исследованных притоках Онежского озера соответствует их средним концентрациям в речных водах Карелии (0,09 и 0,11 мг N/л соответственно) [Лозовик, Бородулина, 2009].

При статистической обработке гидрохимических данных изученных притоков выявлена статистически значимая разница в содержании аммонийного азота в 2015–2016 гг. по сравнению с 2001–2002 гг., свидетельствующая о его снижении. Между этими же периодами в нижнем течении р. Суна наблюдалась статистически значимая разница в концентрациях $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$, что подтверждает снижение фосфорной нагрузки на эту реку. Статистически значимая разница между 2001–2002 и 2015–2016 гг. наблюдалась и в содержании нитритов в Кондопожском канале, которая, однако, находилась в пределах погрешности метода определения.

Таблица 2. Средневзвешенное содержание биогенных элементов в воде крупнейших притоков Онежского озера и их водный сток (Q) в различные периоды

Table 2. The weighted average concentrations of nutrients (C) in the water of the largest tributaries of Lake Onego and their discharge (Q) in different periods

| Река River | Период Period | Q, км ³ /год km ³ /year | P-PO ₄ | P _{общ} TP | N-NH ₄ | N-NO ₂ | N-NO ₃ | N _{орг} TON | N _{общ} TN |
|---|------------------|---|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| | | | мкг/л µg/L | | мг/л mg/L | | | | |
| Водла Vodla | 2001–2002 | 4,00 | 7 | 32 | 0,11 | 0,001 | 0,02 | 0,55 | 0,68 |
| | 2007–2008 | 4,54 | 25 | 91 | 0,04 | 0,001 | 0,03 | 0,59 | 0,66 |
| | 2015–2016 | 3,92 | 9 | 40 | 0,04 | 0,001 | 0,06 | 0,54 | 0,64 |
| Шуя Shuya | 2001–2002 | 2,19 | 8 | 36 | 0,08 | 0,001 | 0,07 | 0,48 | 0,64 |
| | 2007–2008 | 2,97 | 9 | 40 | 0,09 | 0,001 | 0,05 | 0,37 | 0,52 |
| | 2015–2016 | 2,48 | 9 | 41 | 0,04 | 0,001 | 0,06 | 0,52 | 0,61 |
| | 2021 | 3,26 | 19 | 46 | 0,08 | 0,001 | 0,08 | 0,43 | 0,59 |
| Суна (Кондопожский канал) Suna (Kondopoga Canal) | 2001–2002 | 1,54 | 1 | 8 | 0,08 | 0,001 | 0,04 | 0,53 | 0,66 |
| | 2007–2008 | 2,24 | 1 | 11 | 0,03 | 0,002 | 0,09 | 0,39 | 0,51 |
| | 2015–2016 | 2,50 | 2 | 11 | 0,03 | 0,001 | 0,08 | 0,29 | 0,39 |
| Суна (нижнее русло) Suna (lower reach) | 2001–2002 | 0,17 | 105 | 146 | 0,39 | 0,022 | 0,18 | 0,60 | 1,19 |
| | 2007–2008 | 0,23 | 46 | 81 | 0,07 | 0,002 | 0,03 | 0,61 | 0,71 |
| | 2015–2016 | 0,19 | 5 | 31 | 0,03 | 0,001 | 0,02 | 0,58 | 0,64 |

Биогенная нагрузка на Онежское озеро от основных его притоков

Главными поставщиками биогенных элементов в Онежское озеро являются реки Водла и Шуя (табл. 3). Речной сток минеральных форм фосфора в Онежское озеро в большинстве случаев не превышал 28 % от $P_{\text{общ}}$, за исключением р. Шуи в 2021 г. (40 % от стока $P_{\text{общ}}$) и нижнего русла р. Суны в 2001–2002 и 2007–2008 гг. (72 и 61 % от стока $P_{\text{общ}}$ соответственно). Повышение стока $P_{\text{мин}}$ с водами р. Шуи в 2021 г. связано с тем, что помимо увеличения водного стока в ее воде повысилась концентрация $P_{\text{мин}}$ по сравнению с предыдущими периодами исследования (табл. 2). Причиной этого мог стать выход из строя очистных сооружений, а также увеличение фосфорной нагрузки от сельскохозяйственных предприятий, в том числе рыбоводческих ферм, действующих на ее водосборе. Нижнее русло р. Суны в 2001–2002 и 2015–2016 гг. находилось под влиянием сточных вод птицеводческой фермы, которая в настоящий момент закрыта.

Из форм азота в озеро с реками поступают преимущественно органические соединения (72–91 % от стока $N_{\text{общ}}$) (табл. 3). Поступление аммонийного и нитратного азота было близким, в некоторых случаях с преобладанием последнего. Однако наблюдались и исключения: в 2001–2002 гг. в стоке азота с реками Водла и Суна (оба русла) преобладала аммонийная форма, как и в стоке р. Шуи и нижнего течения р. Суны в 2007–2008 гг., что свидетельствует об экологических проблемах, связанных с антропогенным воздействием в эти периоды.

Статистически значимые изменения ($p = 0,04$), свидетельствующие об увеличении фосфорной нагрузки, произошли в поступлении $P_{\text{мин}}$ с р. Шуей в 2007–2008 гг. по сравнению с 2001–2002 гг. Поскольку содержание $P_{\text{мин}}$ в эти периоды было близким, увеличение связано с возрастанием водного стока в 2007–2008 гг. (табл. 3), что свидетельствует о распределенном источнике этого загрязнения. Для р. Водлы и обоих русел р. Суны статистически значимые различия наблюдались только для периодов 2001–2002 и 2015–2016 гг. В 2001–2002 и 2007–2008, а также 2007–2008 и 2015–2016 гг. различия для этих рек не выявлены, предположительно потому, что изменения химического состава крупных рек происходят медленно и не проявились за столь короткий промежуток времени (5–7 лет). В 2015–2016 гг. по сравнению с 2001–2002 гг. произошло уменьшение аммонийной нагрузки от р. Водлы ($p = 0,04$), что, возможно, связано со снижением антропогенного влияния на ее водосборной территории, в том числе и в результате сокращения численности населения [Всероссийская..., 2002; Росстат..., 2023]. Отмечено снижение поступления $P_{\text{мин}}$ ($p = 0,02$) и аммонийного азота ($p = 0,02$) с водами нижнего русла р. Суны, что объясняется закрытием птицефабрики. Статистически значимая разница в стоке $P_{\text{общ}}$ ($p = 0,04$) и нитратов ($p = 0,02$) также установлена для Кондопожского канала. Увеличение биогенной нагрузки могло быть связано с изменением как их содержания, так и водного стока (табл. 3). При этом статистически значимой разницы в суммарной биогенной нагрузке

Таблица 3. Среднегодовой вынос биогенных элементов с крупнейшими притоками Онежского озера в различные периоды

Table 3. Average annual nutrients load from the largest tributaries of Lake Onego in different periods

| Река River | Период Period | $P_{\text{мин}}$ | $P_{\text{общ}}$ | NH_4^+ | NO_2^- | NO_3^- | $N_{\text{орг}}$ | $N_{\text{общ}}$ |
|---|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------|----------|------------------|------------------|
| | | т Р/год t P/year | т Р/год t P/year | т N/год t N/year | | | | |
| Водла Vodla | 2001–2002 | 27 | 126 | 429 | 4 | 80 | 2200 | 2714 |
| | 2007–2008 | 116 | 413 | 186 | 7 | 148 | 2676 | 3010 |
| | 2015–2016 | 36 | 159 | 175 | 4 | 227 | 2100 | 2514 |
| Шуя Shuya | 2001–2002 | 17 | 78 | 183 | 2 | 159 | 1048 | 1392 |
| | 2007–2008 | 26 | 119 | 274 | 3 | 158 | 1102 | 1535 |
| | 2015–2016 | 22 | 103 | 93 | 2 | 141 | 1282 | 1514 |
| | 2021 | 61 | 151 | 259 | 4 | 244 | 1401 | 1907 |
| Суна (Кондопожский канал) Suna (Kondopoga Canal) | 2001–2002 | 2 | 12 | 128 | 2 | 58 | 822 | 1009 |
| | 2007–2008 | 2 | 25 | 65 | 5 | 203 | 866 | 1133 |
| | 2015–2016 | 4 | 27 | 69 | 3 | 199 | 720 | 987 |
| Суна (нижнее русло) Suna (lower reach) | 2001–2002 | 18 | 25 | 66 | 4 | 30 | 102 | 201 |
| | 2007–2008 | 11 | 18 | 15 | 0,5 | 7 | 141 | 162 |
| | 2015–2016 | 1 | 6 | 6 | 0,2 | 4 | 110 | 121 |

от трех основных притоков Онежского озера между изучаемыми периодами не отмечено (критерий ANOVA, $p \gg 0,05$).

Заключение

Проанализирована биогенная нагрузка на Онежское озеро от крупнейших его притоков (рек Водла, Шуя и Суна) в 2001–2002, 2007–2008, 2015–2016 и 2021 (только для р. Шуя) годах. Выявлены изменения в поступлении с этими реками аммонийного и нитратного азота, $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$. В 2007–2008 гг. по сравнению с 2001–2002 гг. увеличилось поступление в Онежское озеро $P_{\text{мин}}$ с р. Шуйей за счет изменения ее водного стока. В 2015–2016 гг. сток аммонийного азота с р. Водлой отличается от аналогичного параметра в 2001–2002 гг., что свидетельствует об уменьшении антропогенной нагрузки в связи с сокращением численности населения на водосборе реки, а также с изменением ее водного стока. Сокращение стока $P_{\text{мин}}$ и аммонийного азота с водами нижнего русла р. Суны в 2015–2016 гг. по сравнению с 2001–2002 гг. связано с закрытием птицефабрики. В этот же период увеличилась нагрузка $P_{\text{общ}}$ и нитратным азотом от Кондопожского канала, что может быть связано с изменением как их концентрации в воде, так и водного стока реки. Статистически значимых изменений общей биогенной нагрузки от трех основных притоков Онежского озера не отмечено.

Литература

- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике* / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
- Карта рыбных хозяйств* // Ассоциация форелеводо-в Карелии [Электронный ресурс]. 2023. URL: <http://kareliatrout.ru/karta-rybnyh-hozjajstv/> (дата обращения: 10.06.2024).
- Атлас Республики Карелия* / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Версо, 2021. 48 с.
- Бискэ Г. С.* Четвертичные отложения и геоморфология Карелии. Петрозаводск: Госиздат Карел. АССР, 1959. 307 с.
- Всероссийская перепись населения 2002 года* [Электронный ресурс]. 2002. URL: <http://www.perepis2002.ru/index.html?id=13> (дата обращения: 01.08.2024).
- Гидрохимия Онежского озера и его притоков* / АН СССР. Ин-т озероведения; Отв. ред. Н. Ф. Соловьева. Л.: Наука, 1973. 243 с.
- Китаев С. П., Ильмаст Н. В., Стерлигова О. П.* Методы оценки биогенной нагрузки от форелевых ферм на водные экосистемы. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2006. 39 с.
- Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях* / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.
- Лозовик П. А.* Геохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М., 2006. 56 с.
- Лозовик П. А., Бородулина Г. С.* Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // *Водные ресурсы*. 2009. Т. 36, № 6. С. 694–704.
- 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 натуральных наблюдений // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2016. № 5. С. 35–52. doi: 10.17076/lim303
- Лозовик П. А., Кулик Н. В., Ефременко Н. А.* Литофильные элементы и тяжелые металлы в Онежском озере: источники поступления, содержание и трансформация // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2020. № 4. С. 62–74. doi: 10.17076/lim1189
- Озера Карелии* / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Пирожкова Г. П.* Химический состав приточных вод бассейна Онежского озера // *Притоки Онежского озера*. Петрозаводск: Карел. науч. центр АН СССР, 1990. С. 4–36.
- Росстат.* Федеральная служба государственной статистики. Муниципальная статистика [Электронный ресурс]. 2023. URL: https://10.rosstat.gov.ru/municipal_statistics (дата обращения: 20.11.2023).
- Сабылина А. В.* Онежское озеро и его притоки. Химический состав воды притоков // *Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг.* Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. С. 21–29.
- Сабылина А. В., Лозовик П. А., Зобков М. Б.* Химический состав Онежского озера и его притоков // *Водные ресурсы*. 2010. Т. 37, № 6. С. 717–729.
- Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M.* Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations // *Environ. Nanotechnol. Manag.* 2022. Vol. 17. Art. 100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619
- Hobbs W. O., Lafrancois B. M., Di Donato E.* Near-shore conditions of the Great Lakes national parks: A baseline water quality and toxicological assessment // *Park Science*. 2016. Vol. 32, no. 2. P. 36–45.
- Escudero-Oñate C.* Intercomparison 1630: pH, conductivity, alkalinity, $\text{NO}_3\text{-N}$, Cl, SO_4 , Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn (ICP Waters report 129/2016). Oslo: Norwegian Institute for Water Research. Report No. 7081 – 2016. URL: <https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/2426546> (дата обращения: 20.11.2023).
- Khodzher T. V., Domysheva V. M., Sorokovikova L. M., Sakirko M. V., Tomberg I. V.* Current chemical composition of Lake Baikal water // *Inland Waters*. 2017. Vol. 7, no. 3. P. 250–258. doi: 10.1080/20442041.2017.1329982

References

- All-Russian population census of 2002. (In Russ.) URL: <http://www.perepis2002.ru/index.html?id=13> (accessed: 01.08.2024).
- A map of fish farms. *Assotsiatsiya forelevodov Karelii = Association of Trout Breeders of Karelia*. 2023. (In Russ.). URL: <http://kareliatrout.ru> (accessed: 10.06.2024).
- Biske G. S. Quaternary deposits and geomorphology of Karelia. Petrozavodsk: Gosizdat Karel. ASSR, 1959. 307 p. (In Russ.).
- Escudero-Oñate C. Intercomparison 1630: pH, conductivity, alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn (ICP Waters report 129/2016). Oslo: Norwegian Institute for Water Research. Report No. 7081 – 2016. URL: <https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/2426546> (accessed: 20.11.2023).
- Filatov N. N. (ed.). Atlas of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: Verso, 2021. 48 p. (In Russ.).
- Filatov N. N. (ed.). The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 375 p. (In Russ.).
- Filatov N. N., Kukharev V. I. Lakes of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 464 p. (In Russ.).
- Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2022;17:100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619
- Hobbs W. O., Lafrancois B. M., Di Donato E. Near-shore conditions of the Great Lakes national parks: A baseline water quality and toxicological assessment. *Park Science*. 2016;32(2):36–45.
- Khodzher T. V., Domyshcheva V. M., Sorokovikova L. M., Sakirko M. V., Tomberg I. V. Current chemical composition of Lake Baikal water. *Inland Waters*. 2017;7(3):250–258. doi: 10.1080/20442041.2017.1329982
- Kitaev S. P., Il'mast N. V., Sterligova O. P. Assessment methods of trout farm nutrient load on water ecosystems. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. 39 p. (In Russ.).
- Lozovik P. A. Geochemical criteria for the state of surface waters of the humid zone and their resistance to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Moscow, 2006. 56 p. (In Russ.).
- Lozovik P. A., Borodulina G. S. Nitrogen compounds in the surface and subsurface waters of Karelia. *Water Resources*. 2009;36(6):672–682. doi: 10.1134/S0097807809060062
- Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondratyev S. A., Litvinenko A. V., Litvinova I. A. Nutrient load on Lake Onego according to field data. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2016;5:35–52. (In Russ.). doi: 10.17076/lim303
- Lozovik P. A., Efremenko N. A. (eds.). Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2017. 272 p. (In Russ.).
- Lozovik P. A., Kulik N. V., Efremenko N. A. Lithophile elements and heavy metals in Lake Onego: sources, concentrations and transformation. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2020;4:62–74. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1189
- Pirozhkova G. P. Chemical composition of tributary waters of the Lake Onego basin. *Pritoki Onezhskogo ozera = Tributaries of Lake Onego*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1990. P. 4–36. (In Russ.).
- Rosstat, 2023. Federal statistical survey. Municipal districts indicators. (In Russ.). URL: https://10.rosstat.gov.ru/municipal_statistics (accessed: 20.11.2023).
- Sabylina A. V. Lake Onego and its tributaries. Chemical composition of the tributaries water. *Sostoyanie vodnykh ob"ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg. = Status of water objects in the Republic of Karelia. According to 1998–2006 monitoring results*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. P. 21–29. (In Russ.).
- Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. Water chemistry in Onega Lake and its tributaries. *Water Resources*. 2010;37(6):842–853. doi: 10.1134/S0097807810060102
- Solov'eva N. F. (ed.). Hydrochemistry of Lake Onego and its tributaries. Leningrad: Nauka; 1973. 243 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию / received: 19.06.2024; принята к публикации / accepted: 16.08.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Галахина Наталия Евгеньевна

канд. хим. наук, старший научный сотрудник
лаб. гидрохимии и гидрогеологии

e-mail: kulakovanata@mail.ru

Зобков Михаил Борисович

канд. техн. наук, руководитель лаб. гидрохимии
и гидрогеологии

e-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Galakhina, Natalia

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher

Zobkov, Mikhail

Cand. Sci. (Tech.), Head of Laboratory of Hydrochemistry
and Hydrogeology