

УДК 556.53:556.55(282.247.211)

СОВРЕМЕННАЯ РЕЧНАЯ БИОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО

© 2024 г. Н. Е. Галахина*, А. В. Сабылина**, М. Б. Зобков***

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ “Карельский научный центр РАН”,
Петрозаводск, Россия*

* E-mail: kulakovanata@mail.ru

** E-mail: efremova.nwpi@mail.ru

*** E-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.03.2024 г.

После доработки 25.11.2024 г.

Принята к публикации 03.12.2024 г.

Оценен речной биогенный сток в Онежское озеро в 2015–2016 гг. ($P_{\text{общ}}$ — 640 т/год, $N_{\text{общ}}$ — 10380 т/год), а также рассчитаны объемы выноса биогенных элементов с водами р. Свирь ($P_{\text{общ}}$ — 290 т/год, $N_{\text{общ}}$ — 9795 т/год). Основной вклад в речную биогенную нагрузку вносят органические формы азота (83% от $N_{\text{общ}}$) и фосфора (73% от $P_{\text{общ}}$). На крупнейшие притоки озера (реки Водла, Шуя, Андома и Кондопожский канал) приходится по 60% от общего стока $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$. Вынос большинства форм биогенных элементов из озера с водами р. Свирь меньше по сравнению с речным их притоком в озеро. При сравнении с результатами исследования тех же рек, проведенного в 2007–2008 гг., значимых изменений в поступлении БЭ в Онежское озеро как с речным стоком в целом, так и с крупнейшими его притоками, не выявлено. Выполнено сравнение удельного выноса БЭ с водосборных территорий крупнейших озер России (Байкал, Ладожское и Онежское озера), отличающихся площадями водосборных территорий и уровнем антропогенной нагрузки.

Ключевые слова: притоки, водный сток, биогенные элементы, антропогенное влияние, удельный вынос

DOI: 10.31857/S0869607124040052, EDN: MOEXED

ВВЕДЕНИЕ

Онежское озеро — один из крупнейших пресноводных водоемов России и Европы (площадь — 9720 км², объем — 295 км³, средняя и максимальная глубины — 30 и 120 м соответственно, период водообмена — 15.6 года) [13]. Площадь его водосборной территории превышает площадь самого озера в 5.5 раз и составляет 53.1 тыс. км² [7]. Главная роль в формировании химического состава воды Онежского озера принадлежит речному стоку. Притоки являются важным источником поступления в водоем биогенных элементов (БЭ) (72% от общего стока $P_{\text{общ}}$ и 68% от общего стока $N_{\text{общ}}$) [11], а также Fe, Mn, Cu и Zn (83–97% от общего стока по каждому компоненту отдельно) [12].

Значительная речная биогенная нагрузка на Онежское озеро является одним из основных факторов, обуславливающих биопродукционный потенциал водоема и определяющих его трофический статус. Вместе с тем изменение биогенной нагрузки от водосборной территории озера и его прибрежной части отражается на состо-

янии водоема. Реки Шуя и Суна существенно влияют на химический состав воды крупнейших заливов Онежского озера (Петрозаводская и Кондопожская губы), в которые они впадают [29]. С 2005 г. происходит интенсивное развитие форелеводства [6] как на акватории самого озера, так и в его бассейне (главным образом на водосборах рек Шуя и Суна) [8]. Форелевые хозяйства являются источником поступления в водоем БЭ и, как следствие, причиной изменения их трофического статуса [33]. Кроме того, по данным [11] очистные сооружения в некоторых населенных пунктах, находящихся в бассейне Онежского озера, работают неэффективно, и неочищенные сточные воды поступают в водные объекты, являясь дополнительным источником биогенных элементов. Известно, что в 2000-х гг. произошло снижение речной биогенной нагрузки на озеро [23] по сравнению с 1965–1966 гг. и 1986–1987 гг. [15, 24] вследствие уменьшения антропогенного воздействия на водосборные территории рек в результате экономического спада 1990-х гг. Однако в 2007–2008 гг. речной вынос $P_{\text{общ}}$ в озеро увеличился в 1.5 раза, $N_{\text{общ}}$ — в 1.1 раза [11] по сравнению с 2001–2002 гг. [20].

Цель данного исследования — оценить речную биогенную нагрузку на Онежское озеро в современный период и проследить ее изменение с начала 2000-х годов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В Онежское озеро впадают 1152 реки со среднемноголетним водным стоком $17.3 \text{ км}^3/\text{год}$ [2]. Вытекает из озера одна река — Свирь, являющаяся крупнейшим притоком Ладожского озера. Более половины бассейна озера занято водосборами главных его притоков — рек Водла, Шуя, Суна и Андома, их вклад составляет около 60% от общего речного стока в озеро [20]. Вследствие неоднородности геологического и геоморфологического строения бассейна Онежского озера особенности его гидрографии являются причиной различий в химическом составе и режиме вод притоков. Бассейн Онежского озера расположен на двух крупных резко отличающихся геологических формированиях: северная часть сложена кристаллическими породами Балтийского щита, южная часть находится на Русской платформе [7, 20]. Притоки северной части бассейна молодые с неразработанными порожистыми руслами и большими уклонами, сток большинства этих рек характеризуется высокой степенью естественного регулирования озерами [20]. Южные притоки более старые с хорошо выработанными руслами, отличаются меньшей озерностью и большей заболоченностью территории. Природная концентрация большинства химических компонентов в южных притоках в 2–3 раза выше, чем в водах северной части бассейна [20, 21].

Гидрохимические наблюдения были выполнены летом и осенью 2015 г., а также зимой и весной 2016 г. на 24 притоках Онежского озера (рис. 1) и в его истоке, р. Свирь. Пробы воды отбирали один раз в гидрологический сезон (весна (апрель–июнь), лето (июль–сентябрь), осень (октябрь–декабрь), зима (январь–март)). В воде по стандартным методикам [1] анализировали содержание аммонийного ($N-NH_4$), нитритного ($N-NO_2$), нитратного ($N-NO_3$) и общего азота ($N_{\text{общ}}$), минерального и общего фосфора ($P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ соответственно). Формы азота и фосфора определяли спектрофотометрическим методом (табл. 1), концентрацию органического азота ($N_{\text{орг}}$) рассчитывали по разнице общего его содержания и минеральных форм. Химические анализы были выполнены в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

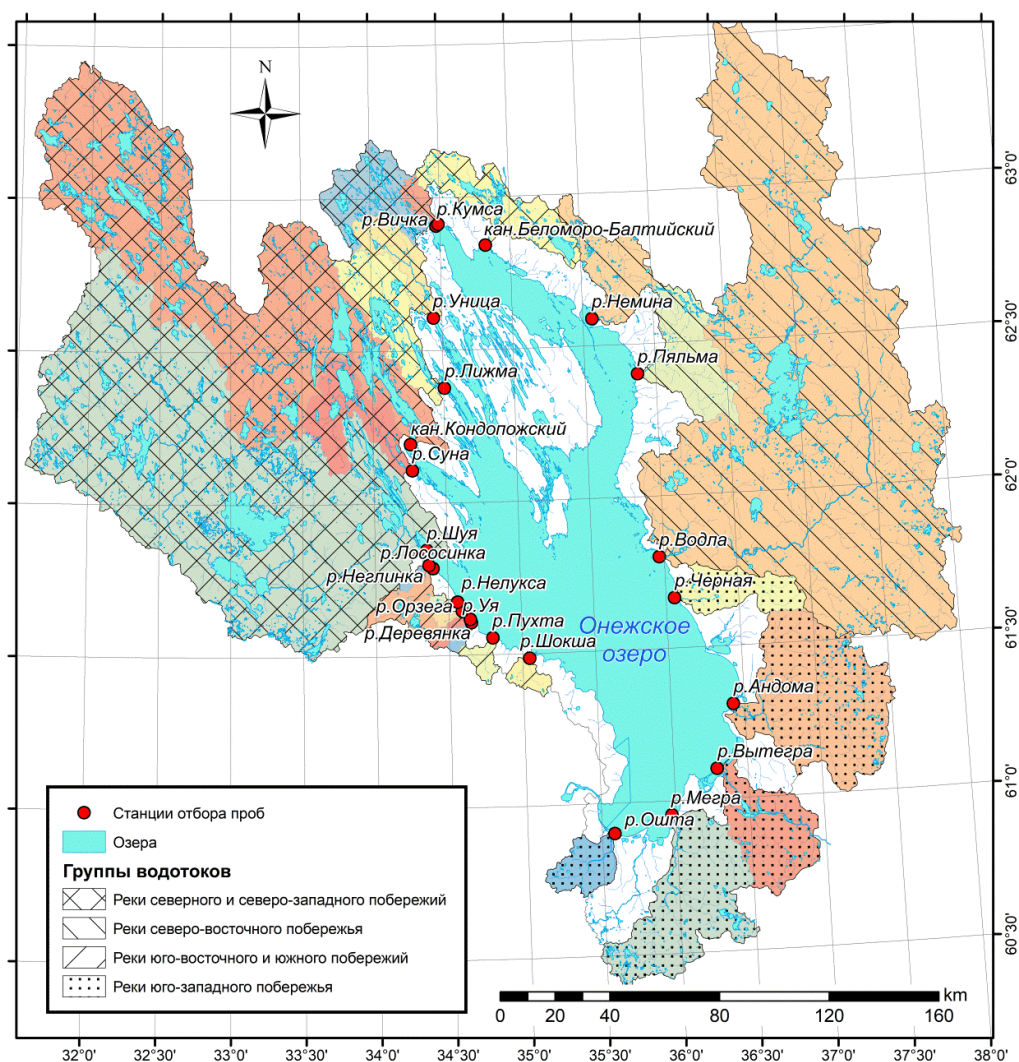


Рис. 1. Карта-схема исследованных притоков Онежского озера и их водосборных территорий (заливкой различных цветов показаны частные водосборы рек).

Fig. 1. Schematic map of the research tributaries of Lake Onego and their catchment areas (color filing identifies specific watersheds of the studied rivers).

Таблица 1. Методы определения химических показателей воды**Table 1.** Methods of water chemical parameters determination

Показатель	Метод определения
NH_4^+	Фотометрическое определение с гипохлоритом и фенолом, $\lambda = 630$ нм
NO_2^-	Фотометрическое определение с сульфаниламидом и N-(1-нафтил)-этилен-диамином, $\lambda = 543$ нм
NO_3^-	Восстановление до NO_2^- на Cd редуторе и определение NO_2^-
$\text{N}_{\text{общ}}$	Окисление $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ в щелочной среде под давлением и определение NO_3^-
$\text{P}_{\text{мин}}$	Фотометрическое определение фосфатов с молибдатом аммония и аскорбиновой кислотой, $\lambda = 882$ нм
$\text{P}_{\text{общ}}$	Окисление $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ в кислой среде и определение фосфатов

ИВПС КарНЦ РАН, качество их выполнения подтверждено хорошей сходимостью данных в рамках международного лабораторного сличения ICP Waters [30].

Гидрохимическая характеристика притоков Онежского озера дана по группам в соответствии с таковой в работе [20]:

- 1) реки северного и северо-западного побережий (Шуя, Суна (оба русла), Кумса, Вичка, Лижма, Уница, ББК);
- 2) реки северо-восточного побережья (Пяльма, Немина, Водла);
- 3) реки юго-восточного и южного побережий (Черная, Андома, Вытегра, Мегра, Ошта);
- 4) реки юго-западного побережья (Шокша, Пухта, Уя, Деревянка, Орзег, Нелукса, Лососинка и Неглинка).

В расчетах речной биогенной нагрузки использовали данные водного стока рек, определенные по модулю годового стока из [11, 14], а внутригодовое распределение стока основных притоков Онежского озера принято по [14]. Среднемноголетний годовой речной сток для обследованных притоков составляет 14.58 км^3 , или 84% от общего речного стока в озеро ($17.3 \text{ км}^3/\text{год}$). Расчет речного биогенного стока в озеро проводился с учетом последнего объема в предположении, что средневзвешенный состав воды необследованных притоков такой же, как и обследованных. Расчет речной биогенной нагрузки на Онежское озеро проводился в несколько этапов. На первом определяли средневзвешенную по объему годовую концентрацию БЭ в каждом притоке, для этого учитывалась доля их стока в каждый сезон. На втором этапе с использованием значений среднегодового стока для каждой из рек рассчитывалась средневзвешенная по объему концентрация БЭ во всех притоках. Для этих целей использовали годовое распределение водного стока по всем обследованным притокам и среднегодовые концентрации веществ в них. Сезонный биогенный сток определяли на основе среднесезонного содержания БЭ в каждом притоке озера и с учетом доли их стока в каждый из гидрологических сезонов.

Статистическая обработка полученных результатов была выполнена при помощи программного обеспечения Sofa Statistics (www.sofastatistics.com). В статистических тестах использовался уровень статистической значимости $p = 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание биогенных элементов в воде притоков Онежского озера

Содержание БЭ в воде притоков Онежского озера в 2015–2016 гг. изменялось в широких пределах (табл. 2), что обусловлено как сезонной их вариабельностью, так и спецификой геохимических и гидрологических условий северной и южной частей его бассейна [20]. Концентрация $P_{\text{мин}}$ в речной воде изменялась от <1 до 257 мкг/л, $P_{\text{общ}}$ — от 10 до 319 мкг/л (табл. 2). Доля $P_{\text{мин}}$ в среднем составила 29% от $P_{\text{общ}}$, в ряде случаев отмечалось его преобладание, связанное либо с антропогенным влиянием на водотоки (реки Неглинка и Лососинка) [22], либо с обогащением минеральными его формами за счет подземного стока в зимний период (реки Черная, Вытегра, Немина, Вичка) [24]. Распределение в речной воде форм азота выглядело следующим образом: в большинстве случаев преобладали органические его соединения, за исключением р. Неглинки в период открытой воды, а также рек Вичка, Деревянка и Нелукса зимой. Среди минеральных форм азота в большинстве притоков Онежского озера в период открытой воды преобладал азот аммонийный, нитраты преобладали в них только зимой за счет увеличения в это время доли грунтового питания [24]. Исключение составили реки Лососинка, Нелукса, Деревянка, Неглинка, Шуя, Кондопожский канал, Кумса, Вичка и Ошта, в которых нитраты преобладали на протяжении всего периода исследований. Повышенное содержание нитритов наблюдалось в воде р. Неглинки (до 0.099 мг N/л), испытывающей антропогенное влияние [22], в других притоках оно изменялось от <0.001 до 0.007 мг N/л.

Минимальная концентрация БЭ характерна для рек северного и северо-западного побережий (табл. 2), что обусловлено составом коренных пород и четвертичных отложений, а также особенностями рельефа местности и гидрографии в этой

Таблица 2. Содержание форм биогенных элементов в воде притоков Онежского озера и в его истоке в 2015–2016 гг. (числитель — среднее значение, знаменатель — пределы колебаний)

Table 2. Content of nutrient forms in the water of the tributaries of Lake Onego and in its outflow in 2015–2016 (in the numerator — mean values, in the denominator — variation ranges)

	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$	$N-NH_4$	$N-NO_2$	$N-NO_3$	$N_{\text{орг}}$	$N_{\text{общ}}$
	мкг/л		мг N/л				
Реки северного и северо-западного побережий	<u>4</u> <1–16	<u>21</u> 10–46	<u>0.04</u> 0.02–0.10	<u>0.001</u> <0.001–0.002	<u>0.06</u> <0.01–0.39	<u>0.41</u> 0.22–0.87	<u>0.51</u> 0.24–0.92
Реки северо-восточного побережья	<u>17</u> 6–41	<u>48</u> 31–75	<u>0.05</u> 0.03–0.07	<u>0.001</u> <0.001–0.002	<u>0.06</u> 0.01–0.17	<u>0.50</u> 0.37–0.61	<u>0.61</u> 0.46–0.75
Реки юго-восточного и южного побережий	<u>22</u> 4–72	<u>59</u> 26–132	<u>0.05</u> 0.02–0.10	<u>0.001</u> <0.001–0.005	<u>0.07</u> <0.01–0.20	<u>0.61</u> 0.20–1.22	<u>0.74</u> 0.31–1.44
Реки юго-западного побережья	<u>41</u> 1–257	<u>82</u> 13–319	<u>0.08</u> 0.02–0.31	<u>0.007</u> <0.001–0.099	<u>0.34</u> <0.01–2.93	<u>0.76</u> 0.33–1.97	<u>1.19</u> 0.39–4.96
Река Свирь	<u>4</u> 1–7	<u>15</u> 11–23	<u>0.04</u> 0.03–0.05	<0.001	<u>0.12</u> 0.10–0.17	<u>0.37</u> 0.22–0.47	<u>0.53</u> 0.36–0.61

части бассейна [20; 24]. Максимальное содержание БЭ наблюдалось в реках юго-западного побережья (табл. 1), которые, в отличие от северных и северо-западных притоков, характеризуются небольшими площадями водосборов, малой озерностью и слабой зарегулированностью их стока [24]. В 2015–2016 гг. наименьшее содержание БЭ отмечено в воде р. Лижма, наибольшее — в р. Неглинке, которая дренирует территорию г. Петрозаводска, в результате чего испытывает сильное антропогенное влияние [22]. Различия в химическом составе северо-восточных и северо-западных притоков, как южных и юго-восточных, также обусловлены отличиями их гидрологических режимов и геологическим строением дренируемых ими пород [24].

В сезонном аспекте минимальная средняя концентрация БЭ в речном притоке наблюдалась в весенний период, когда отмечается максимальный сток всех рек, наибольшая — зимой, когда водный сток становится минимальным, происходит накопление минеральных форм БЭ в озерах и в питании рек возрастает доля подземного стока. В летний и осенний периоды в среднем содержание БЭ было близким. Кроме того, сезонная вариабельность концентрации БЭ обусловлена протеканием продукционно-деструкционных процессов [34].

Согласно гидрохимическим исследованиям притоков Онежского озера, выполненным в 1965–1967 гг. [24], различия между группами рек наблюдались, главным образом, в содержании $P_{\text{мин}}$, наибольший разброс его концентраций наблюдался в реках юго-восточного, юго-западного и южного побережий (1–53 мкг/л), тогда как в реках северного, северо-западного и северо-восточного побережий его изменчивость составила 1–28 мкг/л. Пределы колебаний содержания аммонийного и нитратного азота практически не отличались по группам рек и составили: в реках северо-западного и северного побережья — 0.02–0.13 и <0.01–0.40 мг N/л, северо-восточного — 0.04–0.32 и <0.01–0.35 мг N/л, южного и юго-восточного — 0.01–0.32 и <0.01–0.19 мг N/л, юго-западного — 0.06–0.29 и <0.01–0.30 мг N/л соответственно. Поскольку методики определения БЭ в воде в 1960-х гг. отличались от тех, которые используются в современный период, количественно сравнивать с ними полученные в настоящем исследовании данные не совсем корректно, поэтому

Таблица 3. Содержание БЭ в притоках Онежского озера в 2001–2002 (в числителе) и 2007–2008 гг. (в знаменателе) [20, 21]

Table 3. Nutrients content in the tributaries of Lake Onego in 2001–2002 (in the numerator) and 2007–2008 (in the denominator) [20, 21]

	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$	$N-NH_4^+$	$N-NO_3^-$	$N_{\text{орг}}$
	мкг/л		мг N/л		
Реки северо-западного и северного побережий	<u>1–4</u>	<u>7–30</u>	<u>0.06–0.24</u>	<u><0.01–0.61</u>	<u>0.24–1.61</u>
	1–4	9–48	0.02–0.14	<0.01–0.64	0.26–1.02
Реки северо-восточного побережья	<u>1–18</u>	<u>7–62</u>	<u>0.05–0.18</u>	<u><0.01–0.12</u>	<u>0.29–0.58</u>
	1–56	20–80	0.02–0.08	0.01–0.28	0.21–0.63
Реки юго-восточного и южного побережий	<u>2–21</u>	<u>13–92</u>	<u>0.06–0.15</u>	<u><0.01–0.22</u>	<u>0.21–0.94</u>
	4–44	24–130	0.01–0.11	<0.01–0.31	0.06–0.80
Реки юго-западного побережья	<u>2–61</u>	<u>22–425</u>	<u>0.04–1.27</u>	<u><0.01–3.47</u>	<u>0.38–3.07</u>
	2–85	16–117	0.02–0.64	<0.01–2.58	0.09–2.43

проведено количественное их сопоставление с результатами более поздних работ начала и середины 2000-х годов, выполненных на единой методической базе.

Содержание БЭ в воде притоков Онежского озера в 2015–2016 гг. согласуется с более ранними данными [20, 21]. В 2001–2002 и 2007–2008 гг. в реках юго-западного побережья так же отмечалось высокое содержание БЭ (табл. 3), максимальная концентрация $P_{\text{общ}}$ наблюдалась в реках Неглинка и Лососинка, находящихся в черте г. Петрозаводска [20, 21]. Для рек северного и северо-западного побережий было характерно минимальное содержание $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$. Во всех притоках преобладали органические соединения азота, среди минеральных форм в большинстве рек превалировал азот аммонийный.

Содержание БЭ в воде р. Свирь в 2015–2016 гг. было низким (табл. 2), среди форм азота и фосфора преобладали органические соединения. Концентрация $P_{\text{мин}}$ достигала максимума в зимний период, минимальное ее значение наблюдалось летом (на уровне предела обнаружения). Среди минеральных форм азота, в отличие от большинства притоков Онежского озера, преобладали нитраты, наибольшее их содержание наблюдалось в зимний период, минимальное — летом, как и $P_{\text{мин}}$. Значимых изменений концентрации ионов аммония и нитритов в сезонном аспекте не выявлено.

Речная биогенная нагрузка на Онежское озеро

Максимальный речной сток $P_{\text{мин}}$, $P_{\text{общ}}$, аммонийного, нитритного, органического и общего азота наблюдался весной (36–49% от общего стока), немного меньше — осенью (25–31% от общего стока), минимальный — в периоды межени — зимой и летом (рис. 2). Исключением из общей картины был нитратный азот, максимальное поступление которого наблюдалось зимой (36% от годового стока), а наименьшее, как и по другим компонентам, — в период летней межени (рис. 2). Среди всех БЭ наименьший сток был отмечен для нитритного азота, в 2015–2016 гг. его поступление в Онежское озеро с речными водами составило 10.9 т/год.

В 2015–2016 гг. поступление фосфора общего с речным стоком в Онежское озеро составило 640 т/год, из них 27% приходилось на $P_{\text{мин}}$ (табл. 4) (в 2007–2008 гг. его доля была ниже — 24% от $P_{\text{общ}}$ [11]). Вынос общего азота с речными водами значительно выше — 10380 т/год, в нем превалировал $N_{\text{орг}}$ (8650 т/год), и его доля составила 83%

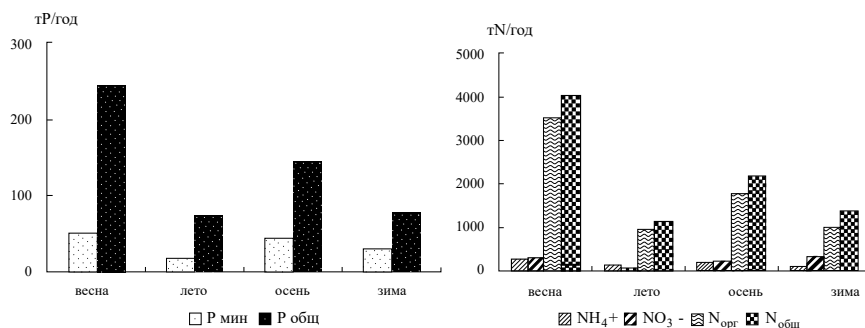


Рис. 2. Сезонный речной биогенный сток в Онежское озеро в 2015–2016 гг.

Fig. 2. Seasonal river nutrient inflow to Onego Lake in 2015–2016.

Таблица 4. Средневзвешенное содержание биогенных элементов в воде притоков, их поступление в Онежское озеро с реками и вынос из него в 2015–2016 гг.

Table 4. Weighted average content of nutrients in the water of the tributaries of Onego Lake, nutrient river inflow and outflow in 2015–2016

Река	Q*, км ³ /год	% от при- тока	P _{мин}	P _{общ}	N- NH ₄	N- NO ₂	N- NO ₃	N _{орг}	N _{общ}
			мкг/л		мгN/л				
Суна	0.02	0.1	5	30	0.03	0.001	0.02	0.57	0.63
Кондопожский канал	2.32	15.9	1	11	0.03	0.001	0.08	0.28	0.39
Лижма	0.28	1.9	1	13	0.02	0.001	0.02	0.32	0.36
Уница	0.13	0.9	3	23	0.06	0.001	0.02	0.65	0.74
Кумса	0.26	1.8	2	11	0.03	0.001	0.04	0.32	0.39
Вичка	0.04	0.3	5	22	0.04	0.001	0.15	0.34	0.53
ББК	0.35	2.4	3	17	0.04	0.0004	0.02	0.28	0.34
Немина	0.29	2.0	23	59	0.05	0.001	0.03	0.45	0.53
Пяльма	0.37	2.5	13	44	0.05	0.001	0.04	0.52	0.61
Водла	4.63	31.8	9	41	0.05	0.001	0.06	0.54	0.65
Черная	0.25	1.7	47	96	0.08	0.001	0.04	1.03	1.16
Андома	1.09	7.5	13	47	0.05	0.001	0.04	0.57	0.65
Вытегра	0.58	4.0	12	35	0.05	0.001	0.07	0.53	0.65
Мегра	0.57	3.9	19	56	0.05	0.001	0.04	0.65	0.73
Ошта	0.11	0.8	6	33	0.05	0.001	0.07	0.53	0.65
Шокша	0.04	0.3	9	37	0.08	0.001	0.08	0.81	0.97
Пухта	0.04	0.3	11	46	0.04	0.001	0.03	0.89	0.96
Уя	0.02	0.1	4	27	0.04	0.001	0.03	0.47	0.53
Деревянка	0.03	0.2	36	74	0.10	0.002	0.18	0.47	0.75
Орзega	0.02	0.1	30	68	0.05	0.001	0.02	0.67	0.74
Нелукса	0.01	0.1	7	35	0.07	0.001	0.35	0.62	1.04
Лососинка	0.11	0.8	41	90	0.07	0.004	0.15	0.51	0.73
Неглинка	0.02	0.1	116	189	0.12	0.032	1.64	1.20	2.99
Шуя	3.00	20.6	9	42	0.04	0.001	0.05	0.52	0.61
Всего	14.58	100							
Средневзвешенные концентрации			10	37	0.04	0.001	0.06	0.50	0.60
Поступление в озеро с исследованными притоками, т/год	14.58		146	539	583	14.6	875	7290	8748
Поступление в озеро со всеми притоками, т/год	17.3		173	640	692	17.3	1038	8650	10380
Сток из озера, т/год	18.6		67	290	709	9	2293	6784	9795

Примечание. * – среднегодовое водное стока, ** – доля водного стока.

Note. * – average annual water discharge, ** – share of water discharge.

от $N_{\text{общ}}$ (табл. 3) (в 2007–2008 гг. — 79% [11]), на NH_4^+ (692 т N/год) и NO_3^- (1038 т N/год) приходилось 7 и 10% от $N_{\text{общ}}$ соответственно. Поступление БЭ в Онежское озеро с речным стоком фактически отражает их содержание в поверхностных водах Карелии, в которых, за исключением больших стратифицированных озер, преобладает $N_{\text{орг}}$, а содержание $P_{\text{мин}}$ составляет 10–20% от $P_{\text{общ}}$ [9].

Поступление $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ с речными водами в Онежское озеро выше стока из него с р. Свирь (табл. 4). Это означает, что в водоеме происходит трансформация лабильных веществ и их удаление из водной среды посредством седиментации и биохимического окисления [10]. Доли $P_{\text{мин}}$ в приточных водах и в истоке из озера близкие (27 и 23% соответственно), тогда как доля минеральных соединений азота в воде р. Свирь почти в 2 раза выше по сравнению с речными водами, поступающими в озеро (31 и 17% соответственно).

Основной вклад в речную биогенную нагрузку вносят крупнейшие притоки озера — реки Водла, Шуя, Андома и Кондопожский канал (одно из русел р. Суны), на них приходится по 60% от общего притока $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ в озеро. При сравнении поступления БЭ в Онежское озеро с этими реками в 2007–2008 [11] и 2015–2016 гг. можно отметить, что сток минеральных форм N и P с р. Водлой несколько увеличился (рис. 3). При этом вынос аммонийного азота с р. Шуйей существенно уменьшился,

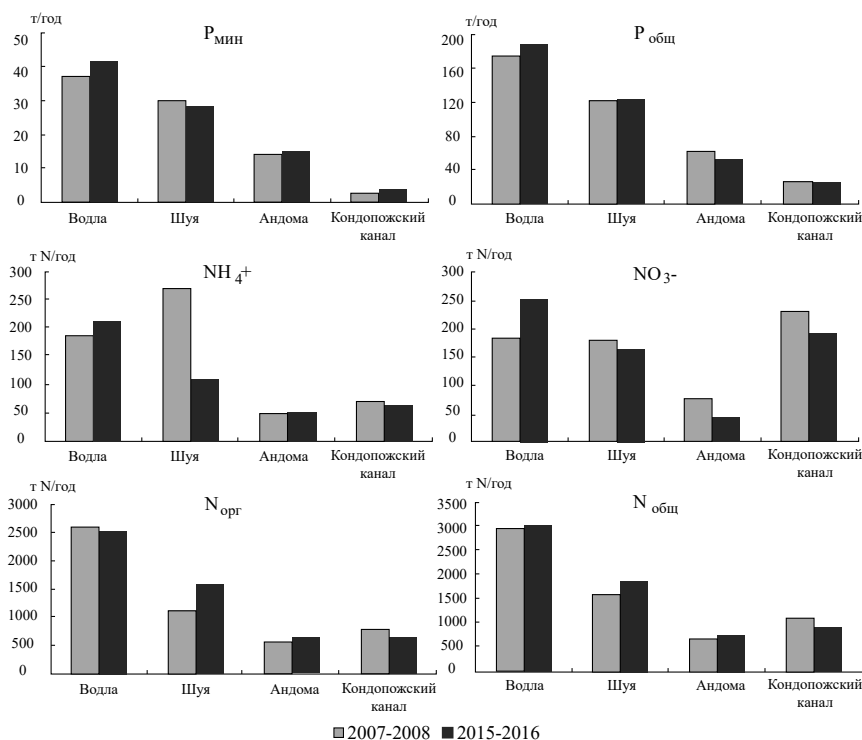


Рис. 3. Биогенный сток в Онежское озеро с основными притоками в 2007–2008 и 2015–2016 гг.

Fig. 3. Nutrient inflow to Lake Onego from the main tributaries in 2007–2008 and 2015–2016.

Таблица 5. Годовой вынос биогенных элементов с малыми притоками в Онежское озеро в различные годы (в числителе — 2007–2008 гг., в знаменателе — 2015–2016 гг.)

Table 5. Annual nutrient inflow to Lake Onego from small tributaries in various time periods (in the numerator — 2007–2008, in the denominator — 2015–2016)

Река	Q*, км³/год	P _{мин}	P _{общ}	N-NH ₄	N-NO ₂	N-NO ₃	N _{орг}	N _{общ}
		т/год		т N/год				
Суна	0.02	<u>1.3</u> 0.1	<u>1.9</u> 0.6	<u>1.2</u> 0.7	<u>0.04</u> 0.01	<u>0.8</u> 0.4	<u>11</u> 11	<u>13</u> 13
Лижма	0.28	<u>0.6</u> 0.2	<u>3.4</u> 3.6	<u>8.4</u> 6.7	<u>0.6</u> 0.1	<u>8.4</u> 4.8	<u>129</u> 89	<u>146</u> 101
Уница	0.13	<u>0.4</u> 0.4	<u>2.9</u> 3.0	<u>7.8</u> 8.0	<u>0.3</u> 0.1	<u>9.1</u> 2.6	<u>62</u> 85	<u>79</u> 96
Кумса	0.26	<u>0.5</u> 0.5	<u>4.4</u> 3.0	<u>10</u> 8.6	<u>0.5</u> 0.2	<u>18</u> 10	<u>94</u> 82	<u>122</u> 101
Вичка	0.04	<u>0.1</u> 0.2	<u>0.8</u> 0.9	<u>2.4</u> 1.7	<u>0.12</u> 0.03	<u>10</u> 5.8	<u>16</u> 14	<u>28</u> 21
ББК	0.35	<u>1.1</u> 1.0	<u>12</u> 6.0	<u>21</u> 13	<u>0.4</u> 0.2	<u>7.0</u> 7.1	<u>125</u> 99	<u>154</u> 119
Немина	0.29	<u>7.0</u> 6.6	<u>17</u> 17	<u>17</u> 13	<u>0.3</u> 0.2	<u>12</u> 10	<u>145</u> 131	<u>174</u> 155
Пяльма	0.37	<u>3.0</u> 4.9	<u>13</u> 16	<u>15</u> 19	<u>0.4</u> 0.3	<u>19</u> 14	<u>204</u> 193	<u>237</u> 226
Черная	0.25	<u>5.8</u> 12	<u>20</u> 24	<u>25</u> 20	<u>0.5</u> 0.4	<u>13</u> 11	<u>170</u> 259	<u>208</u> 290
Вытегра	0.58	<u>12</u> 6.9	<u>42</u> 20	<u>29</u> 26	<u>4.1</u> 0.3	<u>99</u> 38	<u>232</u> 310	<u>360</u> 374
Мегра	0.57	<u>9.7</u> 11	<u>35</u> 32	<u>23</u> 28	<u>1.1</u> 0.5	<u>29</u> 20	<u>325</u> 368	<u>376</u> 417
Ошта	0.11	<u>0.9</u> 0.7	<u>4.3</u> 3.7	<u>5.5</u> 5.8	<u>0.2</u> 0.1	<u>13</u> 8.1	<u>42</u> 58	<u>61</u> 72
Шокша	0.04	<u>0.8</u> 0.4	<u>2.3</u> 1.5	<u>2.8</u> 3.0	<u>0.1</u> 0.04	<u>5.2</u> 3.1	<u>23</u> 33	<u>31</u> 39
Пухта	0.04	<u>0.5</u> 0.5	<u>1.7</u> 1.8	<u>2.0</u> 1.7	<u>0.1</u> 0.03	<u>0.8</u> 1.1	<u>30</u> 35	<u>32</u> 38
Уя	0.02	<u>0.1</u> 0.1	<u>0.5</u> 0.5	<u>0.6</u> 0.7	<u>0.04</u> 0.01	<u>0.8</u> 0.5	<u>13</u> 9	<u>14</u> 11
Деревянка	0.03	<u>1.3</u> 1.1	<u>2.2</u> 2.2	<u>1.5</u> 2.9	<u>0.2</u> 0.1	<u>5.7</u> 5.4	<u>18</u> 14	<u>25</u> 23
Орзega	0.02	<u>0.7</u> 0.6	<u>1.5</u> 1.4	<u>4.8</u> 1.0	<u>0.04</u> 0.01	<u>0.2</u> 0.3	<u>9</u> 13	<u>14</u> 15
Нелукса	0.01	<u>0.1</u> 0.1	<u>0.3</u> 0.4	<u>3.6</u> 0.7	<u>0.05</u> 0.01	<u>11</u> 3.5	<u>20</u> 6.2	<u>35</u> 10
Лососинка	0.11	<u>4.2</u> 4.5	<u>7.6</u> 10	<u>4.4</u> 7.3	<u>0.4</u> 0.5	<u>18</u> 17	<u>57</u> 56	<u>80</u> 80
Неглинка	0.02	<u>1.0</u> 2.3	<u>1.6</u> 3.8	<u>1.4</u> 2.4	<u>0.2</u> 0.7	<u>24</u> 33	<u>25</u> 24	<u>50</u> 60
Всего	17.3	<u>159</u> 173	<u>656</u> 640	<u>900</u> 692	<u>34.6</u> 17.3	<u>1159</u> 1038	<u>8079</u> 8650	<u>10172</u> 10380

однако возросло поступление с ее водами органических форм азота. Вынос нитратов с водами Кондопожского канала и р. Андомы также уменьшился. Однако при статистическом анализе данных с применением непараметрического теста Манна–Уитни значимой разницы в изменении биогенного стока основных притоков между 2007–2008 и 2015–2016 гг. не выявлено ($p > 0.05$).

Существенных изменений в выносе БЭ с малыми притоками в Онежское озеро в рассматриваемые периоды не наблюдается, за исключением рек Суна и Лижма (табл. 5). Сток некоторых форм БЭ с этими реками отличается, при этом значимыми являются различия в выносе азота нитритного (для р. Суны с уровнем значимости $p = 0.03$, р. Лижмы — $p = 0.02$) и $N_{\text{общ}}$ с водами р. Лижмы ($p = 0.02$), он уменьшился в 2015–2016 гг. по сравнению с данными 2007–2008 гг.

***Удельный вынос БЭ с водосбора Онежское озеро
в сравнении с другими крупнейшими озерами России***

Полученные результаты позволяют провести сравнение речной биогенной нагрузки на Онежское озеро с другими крупными озерами России. Так, в 2010–2016 гг. в оз. Байкал с речными водами поступило 1100 т/год $P_{\text{мин}}$ и 8000 т/год $N_{\text{общ}}$ [31]. Информация о речном стоке $P_{\text{общ}}$ в оз. Байкал не обнаружена, однако известно, что нагрузка $P_{\text{общ}}$ от р. Селенги, крупнейшего его притока, составляет в среднем 1700 т/год [32]. С учетом того, что на ее сток приходится 50% общего речного стока в водоем [31], можно предположить, что речная нагрузка на озеро по общему фосфору в среднем достигает 3400 т/год. Согласно данным В.А. Румянцева с соавторами [17], поступление $P_{\text{общ}}$ с речным стоком в Ладожское озеро в зависимости от водности года составляет 3–5 тыс. т/год, $N_{\text{общ}}$ — 55–65 тыс. т/год. Эти озера существенно различаются по площади водосбора (табл. 6), поэтому для сравнения объемов поступления БЭ в них целесообразно использовать показатель удельного выноса БЭ с единицы площади водосбора. Этот показатель отражает как специфику водосборной территории водного объекта [5; 26], так и интенсивность сельскохозяйственной деятельности на его водосборе [25]. Наименьший удельный вынос БЭ получен для имеющего наибольшую площадь водосборной территории оз. Байкал (табл. 6), что свидетельствует о том, что оно испытывает наименьшее воздействие диффузных источников загрязнения [4]. Из всех его притоков максимальная сельскохозяйственная нагрузка приходится на р. Селенга, тогда как в бассейнах других рек она существенно ниже [26]. Основными источниками антропогенного воздействия на оз. Байкал в настоящее время являются недостаточно очищенные сточные воды населенных пунктов, судоходство и интенсивная туристическая деятельность на его

Таблица 6. Удельный вынос биогенных элементов с водосборов крупнейших озер России
Table 6. Specific removal of nutrients from the catchment areas of the largest lakes of Russia

Озеро	Площадь водосбора, км ²	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$
		кг/км ² в год		
Онежское	53100 ¹	3	12	195
Ладожское	258600 ²	—	15	193
Байкал	570000 ³	2	6	14

Примечание. 1 — [7]; 2 — [18]; 3 — [28].

побережье [31, 32]. Удельный вынос $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ с водосборов Онежского и Ладожского озер близок (табл. 6), несмотря на то, что площади их водосборов различаются на порядок. Согласно данным [3], сельскохозяйственная биогенная нагрузка на водосборе Ладожского озера выше в 1.5 раза по $P_{\text{общ}}$ и в 2 раза по $N_{\text{общ}}$ по сравнению с водосбором Онежского озера.

Удельный вынос БЭ с водосборной территории Онежского озера во временном аспекте несущественно изменяется (рис. 4). К 2001–2002 гг. происходит его снижение по обоим компонентам за счет уменьшения антропогенной нагрузки в результате экономического спада 1990-х гг., что согласуется с данными [23], затем величина удельного выноса увеличивается, его значение по $P_{\text{общ}}$ достигает уровня 1965–1967 гг. (рис. 4).

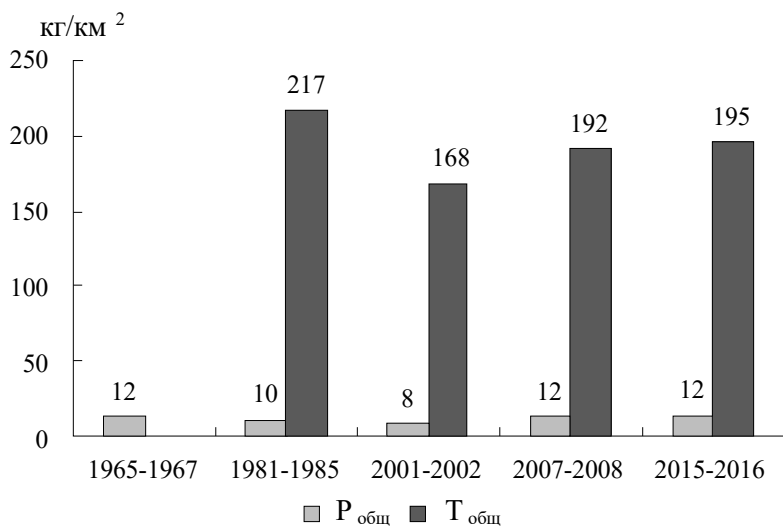


Рис. 4. Удельный вынос БЭ с водосборной территории Онежского озера в различные периоды (рассчитан по данным биогенной нагрузки из [11, 16, 19, 24]).

Fig. 4. Specific removal of nutrients from the Lake Onego catchment in different time periods (calculated by nutrient load data from [11, 16, 19, 24]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных химического состава воды притоков Онежского озера, полученных в 2015–2016 гг., и их среднееголетнего стока определен речной биогенный сток в озеро: поступление фосфора общего составило 640 т/год, общего азота — 10380 т/год. Основной вклад в речной приток БЭ вносят органические формы азота (83% от $N_{\text{общ}}$) и фосфора (73% от $P_{\text{общ}}$). Сток большинства БЭ из озера с водами р. Свирь меньше по сравнению с их речным поступлением. На крупнейшие притоки (реки Водла, Шуя, Кондопожский канал, Андома) приходится по 60% стока $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ от общего их поступления в озеро. Значимых изменений в поступлении БЭ как в целом с речным стоком, так и с крупными притоками в 2015–2016 гг. по сравнению с 2007–2008 гг. не выявлено. Удельный вынос БЭ с водосборных территорий Онежского и Ладожского озер близок, наименьшие его значения установлены для оз. Байкал, что обусловлено меньшей антропогенной нагрузкой на его водосборной

территории. Во временном аспекте происходит колебание удельного выноса биогенных элементов с водосборной территории Онежского озера, связанное с изменением антропогенной нагрузки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Финансовое обеспечение осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН). Исследование выполнено на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
2. Балаганский А. Ф., Карпечко В. А., Литвиненко А. В., Сало Ю. А. Современное состояние и изменение экосистемы Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Гидрологический режим. Ресурсы речного стока и водный баланс // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 31–38.
3. Брюханов В. Ю., Обломкова Н. С., Васильев Э. В. Сельскохозяйственная деятельность на водосборе и сформированная биогенная нагрузка // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. М., 2021. С. 113–125.
4. Кирпичникова Н. В., Полянин В. О., Курбатова И. Е., Черненко Ю. Д. Критерии оценки экологического состояния водосборов малых рек и выноса биогенных веществ в Иваньковское водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 6. С. 81–105. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-6-5>
5. Кольмакова Е. Г., Маслова О. И., Гриб С. В. Биогенный сток рек бассейна Западной Двины как показатель агрохозяйственного освоения водосборов // Вучоны Запискі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. С. Пушкіна. 2011. № 7–2. С. 79–88.
6. Китаев С. П., Ильмаст Н. В., Стерлигова О. П. Методы оценки биогенной нагрузки от форелевых ферм на водные экосистемы. Петрозаводск, 2006. 39 с.
7. Литвиненко А. В., Карпечко В. А. Современное состояние и изменение экосистемы Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Гидрологический режим. Гидрографическая характеристика водоема и его бассейна // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 22–27.
8. Литвинова И. А., Литвиненко А. В., Богданова М. С. Анализ водохозяйственного использования водосбора на основе ГИС-технологий // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 52–60.
9. Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию. Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М., 2006. 56 с.

10. Лозовик П. А. Органическое вещество и биогенные элементы в объектах гидросферы. Источники поступления, внутриводоемные процессы образования и трансформации // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Труды VI Всероссийского симпозиума с международным участием. Барнаул, 2017. С. 141–147.
11. 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 // Труды КарНЦ РАН, 2016. № 5. С. 35–52. <https://doi.org/10.17076/lim303>
12. Лозовик П. А., Кулик Н. В., Ефременко Н. А. Литофильные элементы и тяжелые металлы в Онежском озере: источники поступления, содержание и трансформация // Труды КарНЦ РАН, 2020. № 4. С. 62–74. <https://doi.org/10.17076/lim1189>
13. Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. 464 с.
14. Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с.
15. Пирожкова Г. П. Химический состав приточных вод бассейна Онежского озера // Притоки Онежского озера. Петрозаводск, 1990а. С. 4–36.
16. Пирожкова Г. П. Источники формирования химического состава воды озера // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990б. С. 97–103.
17. Румянцев В. А., Кондратьев С. А., Поздняков Ш. Р., Рябенко В. А., Басова С. Л., Шмакова М. В. Основные факторы, определяющие функционирование водной системы Ладожское озеро — река Нева — Невская губа — восточная часть Финского залива в современных условиях // Известия Русского географического общества. 2012. Т. 144. Вып. 2. С. 55–69.
18. Румянцев В. А., Кудерский Л. А. Ладожское озеро: общая характеристика, экологическое состояние // Общество. Среда. Развитие. 2010. № 2. С. 222–230.
19. Сабылина А. В. Онежское озеро и его притоки. Внешняя нагрузка на Онежское озеро // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007а. С. 19–21.
20. Сабылина А. В. Онежское озеро и его притоки. Химический состав воды притоков // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007б. С. 21–29.
21. Сабылина А. В. Современное состояние и изменение экосистемы Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Гидрохимические исследования. Химический состав воды притоков // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С.
22. Сабылина А. В., Ефремова Т. А., Икко О. И. Химический состав поверхностных, сточных и речных вод, поступающих с территории города Петрозаводска в Онежское озеро // Известия РГО. 2022. Т. 154, № 4. С. 39–53. <https://doi.org/10.31857/S0869607122040073>
23. Сабылина А. В., Лозовик П. А., Зобков М. Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 6. С. 717–729.
24. Соловьева Н. Ф., Расплетина Г. Ф. Гидрохимия притоков Онежского озера и элементы его химического баланса // Гидрохимия Онежского озера и его притоков. Л.: Наука, 1973. С. 3–129.
25. Федорова Е. В., Карпунина О. П., Щипачева Л. А., Беляева И. У. Оценка неконтролируемого стока биогенных веществ с водосборных территорий малых водотоков Среднего Урала, включенных в сельскохозяйственное использование // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 1. С. 68–86. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_1_5

26. Федорова Е. В., Щипачева Л. А., Карпунина О. П., Максимчук Н. С. Роль сельскохозяйственной деятельности в бассейне реки Камы в формировании качества поверхностных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 1. С. 31–46.
27. Цибудеева Д. Ц., Рыбкина И. Д. Оценка антропогенной нагрузки на водосборные территории речных бассейнов Республики Бурятия // Мир науки, культуры, образования, 2014. № 2 (45). С. 405–410.
28. Шнейзер Г. М., Селина Н. А., Иванова Е. И. Гидрохимическая характеристика озера Байкал // Современные наукоемкие технологии. 2007. № 8. С. 89–90.
29. 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. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2022. Vol. 17. 100619. doi:
30. 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. Oslo (Norway): Norwegian Institute for Water Research. Report № 7081–2016 ICP Waters report 129/2016.
31. 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, n. 3. P. 250–258. <http://dx.doi.org/10.1080/20442041.2017.1329982>
32. Khodzher T. V., Domysheva V. M., Sorokovikova L. M., Tomberg I. V., Sakirko M. V. Hydrochemical studies in Lake Baikal: history and nowadays // *Limnology and Freshwater Biology*. 2018. Vol. 1, n. 1. P. 2–9. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-2>
33. Sindilariua P.-D., Reiter R., Wedekind H. Impact of trout aquaculture on water quality and farm effluent treatment options. *Aquat. Living Resour.* 2009. 22, 93–103.
34. Zhang X., Ward B. B., Sigman D. M. Global Nitrogen Cycle: Critical Enzymes, Organisms, and Processes for Nitrogen Budgets and Dynamics. *Chem. Rev.* 2020. Vol. 120, n 12. P. 5252–5307. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00613>

Current river nutrient load on Lake Onego

N. E. Galakhina*, A. V. Sabylina**, M. B. Zobkov***

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

*E-mail: kulakovanata@mail.ru

** E-mail: efremova.nwpi@mail.ru

*** E-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

Abstract – The river nutrient inflow into Lake Onego (TP – 640 t/year, TN – 10380 t/year) and the nutrient outflow with the Svir' River (TP – 290 t/year, TN – 9795 t/year) in 2015–2016 were estimated. The main contribution to the river nutrient load belongs to the organic forms of nitrogen (83% of TN) and phosphorus (73% of TP). The largest tributaries of Lake Onego (the rivers Vodla, Shuya, Andoma and the Kondopoga Canal) each account for 60% of total TP and TN inflow. The outflow of most nutrient forms from the lake with the Svir' River is less compared to their river inflow into the lake. There were no significant changes in nutrient inflow to the lake both with the whole river discharge and with its largest tributaries in 2015–2016 compared to 2007–2008. A comparison of the specific removal of nutrients from the catchment areas of the largest lakes in Russia (Baikal, Lake Ladoga and Lake Onego), which differ in the areas of the drainage areas and the anthropogenic load level, was carried out.

Keywords: tributaries, river discharge, nutrients, anthropogenic impact, specific removal

REFERENCES

1. Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrohimicheskoy praktike / Pod red. P.A. Lozovika, N.A. Efremenko. SPb.: Nestor-Istoriya, 2017. 272 s.
2. Balaganskij A.F., Karpechko V.A., Litvinenko A.V., Salo YU. A. Sovremennoe sostoyanie i izmenenie ekosistemy Onezhskogo ozera (Verhne-Svirskogo vodohranilishcha). Gidrologicheskij rezhim. Resursy rechnogo stoka i vodnyj balans // Krupnejshie ozera-vodohranilishcha Severo-Zapada evropejskoj territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskih i antropogennyh vozdejstviyah. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2015. S. 31–38.
3. Bryuhanov V. YU., Oblomkova N.S., Vasil'ev E.V. Sel'skohozyajstvennaya deyatel'nost' na vodosbore i sformirovannaya biogennaya nagruzka // Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoj transformacii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyah izmenyayushchegosya klimata. M., 2021. S. 113–125.
4. Kirpichnikova N.V., Polyanin V.O., Kurbatova I.E., Chernenko YU. D. Kriterii ocenki ekologicheskogo sostoyaniya vodosborov malyh rek i vynosa biogennyh veshchestv v Ivan'kovskoe vodohranilishche // Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie. 2021. № 6. S. 81–105. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-6-5>
5. Kol'makova E. G., Maslova O.I., Grib S.V. Biogennyj stok rek bassejna Zapadnoj Dviny kak pokazatel' agrohozyajstvennogo osvoeniya vodosborov // Vuchonyya Zapiski Bresckaga dzyarzhaj'naga universiteta imya A. S. Pushkina. 2011. № 7–2. S. 79–88.
6. Kitaev S.P., Il'mast N. V., Sterligova O.P. Metody ocenki biogЕННОJ nagruzki ot forelevyh ferm na vodnye ekosistemy. Petrozavodsk, 2006. 39 s.
7. Litvinenko A.V., Karpechko V.A. Sovremennoe sostoyanie i izmenenie ekosistemy Onezhskogo ozera (Verhne-Svirskogo vodohranilishcha). Gidrologicheskij rezhim. Gidrograficheskaya harakteristika vodoema i ego bassejna // Krupnejshie ozera-vodohranilishcha Severo-Zapada evropejskoj territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskih i antropogennyh vozdejstviyah. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2015. S. 22–27.
8. Litvinova I.A., Litvinenko A.V., Bogdanova M.S. Analiz vodohozyajstvennogo ispol'zovaniya vodosbora na osnove GIS-tekhnologij // Krupnejshie ozera-vodohranilishcha Severo-Zapada evropejskoj territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskih i antropogennyh vozmozhnostyah. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2015. S. 52–60.
9. Lozovik P.A. Gidrogeohimicheskie kriterii sostoyaniya poverhnostnyh vod gumidnoj zony i ih ustojchivosti k antropogennomu vozdejstviyu. Avtoref. dis. ... dokt. him. nauk. M., 2006. 56 s.
10. Lozovik P.A. Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy v ob'ektah gidrosfery. Istochniki postupleniya, vntrivodoemnye processy obrazovaniya i transformacii // Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutrennih vodoemah i morskikh vodah: Trudy VI Vserossijskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem. Barnaul, 2017. S. 141–147.
11. Lozovik P.A., Borodulina G.S., Karpechko YU. V., Kondrat'ev S. A., Litvinenko A.V., Litvinova I.A. Biogennaya nagruzka na Onezhskoe ozero po dannym naturnyh nablyudenij // Trudy KarNC RAN, 2016. № 5. S. 35–52. <https://doi.org/10.17076/lim303>
12. Lozovik P.A., Kulik N.V., Efremenko N.A. Litofil'nye elementy i tyazhelye metally v Onezhskom ozere: istochniki postupleniya, sodержanie i transformaciya // Trudy KarNC RAN, 2020. № 4. S. 62–74. <https://doi.org/10.17076/lim1189>
13. Ozera Karelii. Spravochnik / Pod red. N.N. Filatova, V.I. Kuhareva. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2013. 464 s.
14. Onezhskoe ozero. Atlas / Pod red. N.N. Filatov. Petrozavodsk, 2010. 151 s.
15. Pirozhkova G.P. Himicheskij sostav pritochnyh vod bassejna Onezhskogo ozera // Pritoki Onezhskogo ozera. Petrozavodsk, 1990a. S. 4–36.

16. Pirozhkova G. P. Istochniki formirovaniya himicheskogo sostava vody ozera // *Ekosistema Onezhskogo ozera i tendencii ee izmeneniya*. L.: Nauka, 1990b. S. 97–103.
17. Rumyantsev V. A., Kondrat'ev S. A., Pozdnyakov S. H. R., Ryabchenko V. A., Basova S. L., SHmakova M. V. Osnovnye faktory, opredelyayushchie funkcionirovanie vodnoj sistemy Ladozhskoe ozero — reka Neva — Nevskaya guba — vostochnaya chast' Finskogo zaliva v sovremennykh usloviyakh // *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2012. T. 144. Vyp. 2. S. 55–69.
18. Rumyantsev V. A., Kuderskiy L. A. Ladozhskoe ozero: obshchaya harakteristika, ekologicheskoe sostoyanie // *Obshchestvo. Sreda. Razvitie*. 2010. № 2. S. 222–230.
19. Sabylina A. V. Onezhskoe ozero i ego pritoki. Vneshnyaya nagruzka na Onezhskoe ozero // *Sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg.* Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2007a. S. 19–21.
20. Sabylina A. V. Onezhskoe ozero i ego pritoki. Himicheskij sostav vody pritokov // *Sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg.* Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2007b. S. 21–29.
21. Sabylina A. V. Sovremennoe sostoyanie i izmenenie ekosistemy Onezhskogo ozera (Verhne-Svirsogo vodohranilishcha). Gidrohimiya pritokov Onezhskogo ozera i elementy ego himicheskogo balansa // *Gidrohimiya Onezhskogo ozera i ego pritokov*. L.: Nauka, 1973. S. 3–129.
22. Sabylina A. V., Efremova T. A., Ikko O. I. Himicheskij sostav poverhnostnykh, stochnykh i rechnykh vod, postupayushchikh s territorii goroda Petrozavodsk v Onezhskoe ozero // *Izvestiya RGO*. 2022. T. 154, № 4. S. 39–53. <https://doi.org/10.31857/S0869607122040073>
23. Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. Himicheskij sostav vody Onezhskogo ozera i ego pritokov // *Vodnye resursy*. 2010. T. 37, № 6. S. 717–729.
24. Solov'eva N. F., Raspletina G. F. Gidrohimiya pritokov Onezhskogo ozera i elementy ego himicheskogo balansa // *Gidrohimiya Onezhskogo ozera i ego pritokov*. L.: Nauka, 1973. S. 3–129.
25. Fedorova E. V., Karpunina O. P., SHCHipacheva L. A., Belyaeva I. U. Ocenka nekontroliruemogo stoka biogennykh veshchestv s vodosbornykh territorij mal'kh vodotokov Srednego Urala, vkl'yuchennykh v sel'skohozyajstvennoe ispol'zovanie // *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2022. № 1. S. 68–86. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_1_5.
26. Fedorova E. V., SHCHipacheva L. A., Karpunina O. P., Maksimchuk N. S. Rol' sel'skohozyajstvennoj deyatel'nosti v bassejne reki Kamy v formirovanii kachestva poverhnostnykh vod // *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2012. № 1. S. 31–46.
27. Cibudeeva D. C., Rybkina I. D. Ocenka antropogennoj nagruzki na vodosbornye territorii rechnykh bassejnov Respubliki Buryatiya // *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya*, 2014. № 2 (45). S. 405–410.
28. SHpejzer G. M., Selina N. A., Ivanova E. I. Gidrohimiya pritokov Bajkal // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2007. № 8. S. 89–90.
29. 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. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2022. Vol. 17. 100619. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100619>
30. Intercomparison 1630: pH, conductivity, alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn. Oslo (Norway): Norwegian Institute for Water Research. Report No. 7081–2016 ICP Waters report 129/2016.

31. 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, n. 3. P. 250–258. <http://dx.doi.org/10.1080/20442041.2017.1329982>
32. Khodzher T. V., Domysheva V. M., Sorokovikova L. M., Tomberg I. V., Sakirko M. V. Hydrochemical studies in Lake Baikal: history and nowadays // *Limnology and Freshwater Biology*. 2018. Vol. 1, n. 1. P. 2–9. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-2>
33. Sindilariua P.-D., Reiter R., Wedekind H. Impact of trout aquaculture on water quality and farm effluent treatment options. *Aquat. Living Resour.* 2009. 22, 93–103.
34. Zhang X., Ward B. B., Sigman D. M. Global Nitrogen Cycle: Critical Enzymes, Organisms, and Processes for Nitrogen Budgets and Dynamics. *Chem. Rev.* 2020. Vol. 120, n 12. P. 5252–5307. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00613>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галахина Наталия Евгеньевна

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ “Карельский научный центр РАН”, Россия, Петрозаводск

e-mail: kulakovanata@mail.ru

Galakhina Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Russia, Petrozavodsk

e-mail: kulakovanata@mail.ru

Сабылина Альбина Васильевна

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ “Карельский научный центр РАН”, Россия, Петрозаводск

e-mail: efremova.nwpi@mail.ru

Sabylina Albina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Russia, Petrozavodsk

e-mail: efremova.nwpi@mail.ru

Зобков Михаил Борисович

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ “Карельский научный центр РАН”, Россия, Петрозаводск

e-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

Zobkov Mikhail

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Russia, Petrozavodsk

e-mail: ya-mikhailz@yandex.ru