

## ГИДРОХИМИЯ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

УДК 556.55

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ДОПУСТИМЫЕ БИОГЕННЫЕ НАГРУЗКИ НА ПСКОВСКО-ЧУДСКОЕ ОЗЕРО

**П. А. Лозовик<sup>1</sup>, Г. Т. Фрумин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

<sup>2</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

Представлено качество воды оз. Псковско-Чудское по материалам многолетних наблюдений. Озеро тяготеет к эвтрофному типу, характеризуется мутной водой и дефицитом кислорода в придонных слоях воды в период зимней и летней стагнации. Проведено нормирование биогенной нагрузки на озеро по его ассимиляционной способности. Современный уровень фосфорной и азотной нагрузок превышает допустимый, и требуется снижение поступления фосфора и азота от точечных и рассеянных источников загрязнения.

Ключевые слова: качество воды; Псковско-Чудское озеро; биогенные элементы; эвтрофирование; ассимиляционная способность; биогенная нагрузка; нормирование антропогенной нагрузки.

#### **P. A. Lozovik, G. T. Frumin. PRESENT-DAY STATE AND PERMISSIBLE NUTRIENT LOADINGS ON LAKE PEIPUS**

The quality of water in Lake Peipus (Pskov-Chudskoye) is described according to data from long-term monitoring. The lake tends to be of the eutrophic type, with turbid water and oxygen deficiency in near-bottom water layers during winter and summer stagnation. Permissible nutrient loadings on the lake were defined according to its assimilating capacity. Current phosphorus and nitrogen loadings are above the permissible levels, and P and N supply from point and non-point sources needs to be reduced.

Keywords: water quality; Lake Peipus; nutrients; eutrophication; assimilating capacity; nutrient loading; normative regulation of human impact.

#### **Введение**

Псковско-Чудское озеро – четвертый по величине водоем Европы. Его площадь составляет

7955 км<sup>2</sup>, средняя глубина – 7,1 м, объем воды – 25,07 км<sup>3</sup>, площадь водосбора – 44 265 км<sup>2</sup>, удельный водосбор – 5,6 [Псковско-Чудское озеро..., 2012]. Судя по удельному водосбору,



Схема водосбора Псковско-Чудского озера:  
1 – границы водосбора, 2 – государственная граница

озеро характеризуется высокой долей атмосферного питания и несущественным эффектом водосборной территории на его режим. Оно условно делится на три части: озера Псковское, Теплое и Чудское (рис.).

Наиболее крупное – оз. Чудское (73 % площади), самое маленькое – Теплое (7 % площади). Объем речного притока в озеро в 2001–2005 гг. составляет 9,23 км<sup>3</sup>/год, осадки – 2,46, испарение – 1,62, объем стока – 10,07 км<sup>3</sup>/год. Период водообмена по стоку равняется 2,19 год<sup>-1</sup>. По последнему показателю озеро можно отнести к малопроточному, и это отражается на внутриводоемных процессах,

способствуя трансформации и образованию вещества в озере. Наиболее крупными притоками являются р. Великая (объем притока 5,77 км<sup>3</sup>/год) на российской территории и р. Эмайыги на эстонской (объем притока 2,39 км<sup>3</sup>/год), которые дают 88 % всего речного притока в озеро.

Территориально Псковско-Чудское озеро делится на российскую часть (45 % его площади) и эстонскую (55 %). Оно испытывает значительную антропогенную нагрузку от точечных и рассеянных источников загрязнения. Первые связаны со сбросом сточных вод на его водосборе (города Псков, Гдов, Тарту и другие населенные

пункты). Вторые – диффузные за счет сельскохозяйственных объектов. Хотя сельскохозяйственное производство и в Псковской области, и в Эстонии существенно сократилось, вынос биогенных элементов (БЭ) со стоком рек изменился мало, поскольку для восстановления сельхозугодий требуется значительное время.

Псковско-Чудское озеро является пограничным, и всегда актуальны проблемы использования и охраны его вод. Ими занимается Российско-Эстонская комиссия, в задачу которой входит регулирование всех вопросов, связанных с трансграничным водным объектом. Поэтому целью настоящей работы было оценить современное состояние оз. Псковско-Чудское и установить допустимую биогенную нагрузку на озеро. При подготовке статьи привлекались данные совместных исследований озера Россией и Эстонией, а также опубликованные материалы [Назаров, 1984; Кондратьев и др., 2010; Псковско-Чудское озеро..., 2012].

### Оценка современного состояния оз. Псковско-Чудского по материалам многолетних исследований

Особенности геологического строения водосборной территории водоема и антропогенного влияния отражаются на химических показателях его воды. Так, величина минерализации воды озера достигает 225 мг/л, а среди ионов существенно доминируют  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$  (табл. 1). Последнее связано с тем, что притоки озера дренируют древний геологический слой Девон, богатый карбонатами кальция, магния.

Таблица 1.  $\Sigma_{\text{и}}$  и ионный состав воды Псковско-Чудского озера (средние значения по данным наблюдений 2001–2005 гг.)

Ион	C, мг/л	$C_{\text{N}}$ , моль-экв/л
$\text{Ca}^{2+}$	37,9	1,893
$\text{Mg}^{2+}$	10,5	0,867
$\text{Na}^+$	5,1	0,220
$\text{K}^+$	2,1	0,055
$\text{HCO}_3^-$	140,9	2,313
$\text{SO}_4^{2-}$	20,2	0,423
$\text{Cl}^-$	8,1	0,227
$A_{\text{орг}}^-$	-	0,069
$\text{NO}_3^-$	0,2	0,003
$\Sigma_{\text{и}}$	225,0	3,035

$$\text{Формула Курлова} \\ \text{Ca}^{2+}62\text{Mg}^{2+}29\text{Na}+7\text{K}^{+}2 \\ \text{HCO}_3^{-}76\text{SO}_4^{2-}14\text{Cl}^{-}7\text{A}_{\text{орг}}^{-}2$$

По содержанию органического вещества (ОВ) оз. Псковско-Чудское относится к мезогумусным, т. е. характеризуется средним его

содержанием. Так, цветность воды озера, по среднемноголетним данным (1950–2006 гг.), – 35 град., химическое потребление кислорода (ХПК) – 29 мгО/л [Псковско-Чудское озеро..., 2012]. К сожалению, определение перманганатной окисляемости (ПО) не приводилось. Если принять ее за 50 % от ХПК, то ПО составит 14,5 мгО/л. В таком случае гумусность воды озера будет следующей:  $\text{Hum} = \sqrt{\text{ЦВ} \cdot \text{ПО}} = 22,5 \text{ ед. hum}$ . С использованием эм-

$$\text{пирической формулы: } \rho_{\text{авт}} = \frac{0,62\text{ХПК}}{\sqrt{\text{Hum}}} - 0,35 \text{ [Лозовик и др., 2007]}$$

можно оценить содержание автохтонного и аллохтонного ОВ в воде озера:  $\rho_{\text{авт}} = 0,62 \cdot 29 / 22,5 - 0,35 = 0,45$ ,  $\rho_{\text{алл}} = 0,55$ . Как видно из расчетов, в водоеме близки доли автохтонного и аллохтонного ОВ. Связано это с тем, что озеро характеризуется достаточно замедленным водообменом ( $\tau = 2,2$  года), низким удельным водосбором ( $\Delta F_{\text{уд}} = 5,6$ ) и повышенной трофией (эвтрофное). Указанные факторы способствуют накоплению автохтонного ОВ [Лозовик и др., 2007].

Бесспорно, особый интерес представляет распределение и содержание в воде озера биогенных элементов (соединений N, P), от которых во многом зависит уровень его трофии и продуктивность. Так, среднемноголетнее (2001–2005 гг.) содержание  $P_{\text{мин}}$  в воде озера – 6 мкг/л,  $P_{\text{общ}}$  – 37 мкг/л. В 2015 г. их концентрации были близки к среднемноголетним (6 и 38 мкг/л соответственно). В 2015 г. было определено содержание растворенного  $P_{\text{общ}}$ , которое в среднем составило 14 мкг/л. Из чего следует, что в воде озера очень велика доля взвешенного фосфора ( $P_{\text{взв}} = 38 - 14 = 24$  мкг/л), которая достигает 63 % от  $P_{\text{общ}}$ . По содержанию  $P_{\text{общ}}$  с учетом гумусности воды озеро относится к эвтрофному типу [Лозовик, 2013]. Такую же трофию показывает и содержание Chl A (15 мкг/л) согласно классификации С. П. Китаева [2007].

Весьма интересным и необычным оказалось распределение и содержание форм азота в воде озера в период открытой воды:

$$N_{\text{общ}} > N_{\text{орг}} \gg N - \text{NH}_4^+ > N - \text{NO}_3^- \gg N - \text{NO}_2^- \\ 0,67 > 0,53 \gg 0,085 > 0,05 \gg 0,003 \text{ мгN/л.}$$

Из всех форм азота преобладает органическая (79 %), на втором месте аммонийная (13 %) и на третьем – нитратная (7 %). Концентрации нитритов весьма низкие, и они намного меньше ПДК для рыбохозяйственных водоемов по  $\text{NO}_2^-$  (20 мкгN/л). На фоне больших стратифицированных озер Онежского и Ладожского в Псковско-Чудском преобладает  $N_{\text{орг}}$ . Связано это с тем, что оз. Псковско-Чудское менее

стратифицировано. Средняя глубина в нем – 7,1 м, а в Онего и Ладоге – 30 и 50 м соответственно [Современное состояние..., 1998]. Псковско-Чудское озеро – эвтрофное, все нитраты в период открытой воды идут на развитие первичной продукции, тогда как Онего и Ладога – олиготрофные, низкопродуктивные. И только в зимний период в Псковско-Чудском озере наблюдается накопление нитратов и уменьшение доли  $N_{орг}$ ,  $N - NH_4^+$ :

$$N_{общ} > N_{орг} > N - NO_3^- \gg N - NH_4^+ \gg N - NO_2^-$$

$$0,86 > 0,56 > 0,26 \gg 0,04 \gg 0,005 \text{ мгN/л.}$$

В этот сезон доля  $N_{орг}$  составляет 65 % от  $N_{общ}$ ,  $NO_3^-$  – 30 %,  $NH_4^+$  – 5 %. Изменение содержания форм азота зимой по сравнению с другими сезонами года связано с протеканием нитрификации и отсутствием активного потребления  $NO_3^-$ .

Важным компонентом озерных экосистем являются литофильные элементы (Al, Fe, Mn и Si), растворимость соединений которых в воде низкая, но они широко распространены в земной коре. Для соединений литофильных элементов характерна высокая седиментация в озерах, и их концентрация в воде озер намного ниже, чем в приточных водах. Так, среднее содержание  $Fe_{общ}$  – 0,03 мг/л (2015 г.), Mn – 2,4 мкг/л (2015 г.), Si – 1,0 мг/л (открытая вода 1953–2006 гг.), 1,6 мг/л (зима 1953–2006 гг.). По  $SiO_2$  имеются сезонные отличия: зимой его больше, чем в другие сезоны года. Связано это с регенерацией Si из диатомовых водорослей, захороненных в донных отложениях.

Газовый состав, величина pH и содержание взвешенных веществ в оз. Псковско-Чудском имеют свои особенности, обусловленные функционированием экосистемы озера. Так, насыщение воды кислородом в период открытой воды изменяется в пределах 44–189 % (в среднем 99 %), а зимой – 2–122 % (в среднем на поверхности 95 %, у дна – 33 %). Наиболее неудовлетворительный кислородный режим в зимний период в придонных слоях воды в результате потребления  $O_2$  на окисление  $OB$  в донных отложениях.

Величина pH зимой изменяется в пределах 7,2–8,5 (в среднем 8,0), а в другие сезоны – 7,0–9,4 (в среднем 8,2). В период открытой воды pH выше, чем зимой, и связано это с потреблением углекислого газа планктоном. Судя по величине pH и высокой щелочности воды, концентрация  $CO_2$  в воде озера низкая или он вообще отсутствует. Величина pH в воде озера соответствует зимой области слабощелочных нейтральных вод (pH 7,0–8,2), а в другие сезоны года – больше слабощелочных (8,2–9,4).

Озеро Псковско-Чудское выделяется очень высоким содержанием взвешенных веществ, судя по данным наблюдений в 2015 г. Так, их концентрация изменялась в пределах 2,5–31 мг/л (в среднем 8,6 мг/л из 19 определений). В сравнении с Онего и Ладогой содержание взвеси в воде Псковско-Чудского озера на порядок выше, что связано со значительным ее поступлением с речными водами и, по-видимому, взмучиванием ветром донных отложений на мелководных участках озера.

Из загрязняющих веществ в воде озера в 2015 г. были исследованы нефтепродукты, фенолы, тяжелые металлы (Pb, Cu, Cd). Концентрация нефтепродуктов в большинстве проб (17 из 19) была ниже ( $\leq 0,04$  мг/л) ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Во всех пробах содержание Pb и Cd было также ниже ПДК. И только Cu было большей частью выше. Последнее скорее не связано с загрязнением озера медью, а обусловлено наличием большого количества взвеси в озере.

С учетом средних концентраций загрязняющих веществ и их региональных ПДК, установленных для водных объектов Карелии [Лозовик, Кулакова, 2014], региональный индекс загрязнения воды ( $ИЗВ_{рег}$ ) составил 0,77, что соответствует категории чистых вод ( $ИЗВ_{рег} = 0,2–1,0$ ).

Таким образом, подводя итоги проведенного анализа современного состояния оз. Псковско-Чудское, можно выделить следующие особенности его гидрохимического режима. В частности, по гумусности озеро соответствует мезогумусному типу, по щелочности и pH – высокощелочностному слабощелочному нейтральному (зимой) или слабощелочному (весной, летом и осенью), по трофности (содержанию  $P_{общ}$ ) – эвтрофному, по концентрации взвешенных веществ – высокомутному, по кислородному режиму: в период открытой воды – с хорошим насыщением воды кислородом, зимой – с удовлетворительным, по содержанию загрязняющих веществ – типу условно чистых.

На основании полученных качественных отличительных признаков можно дать интегральную оценку качества воды путем расчета индекса качества (ИК) согласно рекомендациям [Лозовик, 2013]. Поскольку в нашем случае дополнительно рассматриваются взвешенные и загрязняющие вещества, по которым в работе [Лозовик, 2013] нет сведений, примем следующие баллы качества воды по взвеси:

$\leq 1,25$  мг/л – высокое (5)

1,25–2,5 – хорошее (4)

2,5–5,0 – удовлетворительное (3)

5,0–10,0 – низкое (2)

$< 10,0$  – очень низкое (1);

и по загрязняющим веществам:

$$\text{ИЗВ}_{\text{рег}} - \leq 0,2 - \text{очень чистая (5)}$$

$$0,2-1,0 - \text{чистая (4)}$$

$$1,0-2,0 - \text{умеренно загрязненная (3)}$$

$$2,0-4,0 - \text{загрязненная (2)}$$

$$\geq 4,0 - \text{грязная} - \text{чрезвычайно грязная (1)}.$$

С учетом указанных баллов мы можем рассчитать ИК для периода открытой воды и зимнего сезона:  $(\text{ИЗВ}_{\text{рег}})_{\text{открытая вода}} = \sqrt{4 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4} = 3,4$  балла,

$(\text{ИЗВ}_{\text{рег}})_{\text{зима}} = \sqrt{4 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4} = 3,8$  балла. Как

видно из приведенных расчетов, качество воды Псковско-Чудского озера зимой несколько выше, чем в период открытой воды, что связано с меньшим содержанием взвеси в воде озера зимой. В то же время кислородный режим хуже зимой, чем в другие сезоны года.

В целом оз. Псковско-Чудское тяготеет к пограничной области качества воды (удовлетворительно-хорошее), которое ниже по сравнению с Ладожским и Онежским озерами (для них характерно хорошее и высокое качество воды).

### Допустимые биогенные нагрузки на Псковско-Чудское озеро

Из анализа гидрохимических данных по Псковско-Чудскому озеру в предыдущем разделе следует, что основным последствием антропогенного влияния на озеро является его эвтрофирование, связанное с избыточным поступлением БЭ от точечных и рассеянных, в основном сельскохозяйственных, источников загрязнения.

В водных объектах активно протекают процессы трансформации веществ, которые приводят к их удалению из водной среды, и тем самым происходит самоочищение водоемов и водотоков. Оценка ассимиляционного потенциала, или самоочистительной способности, водных объектов представляет большой практический интерес, поскольку на ее основе может быть осуществлено нормирование поступления веществ от антропогенных источников.

Ассимиляционная способность водного объекта оценивается по истинной скорости трансформации вещества в его воде и определяется как произведение концентрации вещества (С) на константу скорости его трансформации (k):

$$v = kC. \quad (1)$$

Для рек ассимиляция ( $As_{\text{рек}}$ ) будет выражаться произведением скорости на среднегодовой сток реки в данном створе ( $V_{\text{сток}}$ ):  $(As)_{\text{рек}} = kC_p \cdot V_{\text{сток}}$ . Для озер необходимо учитывать

ассимиляцию вещества как в озерной котловине ( $As_{\text{оз}}$ ), так и в стоке из озера ( $As_{\text{сток}}$ ):

$$(As)_{\text{оз}} = kC_{\text{оз}} \cdot V_{\text{оз}}, \quad (2)$$

$$(As)_{\text{сток}} = kC_{\text{оз}} \cdot V_{\text{сток}}, \quad (3)$$

где  $C_{\text{оз}}$  – концентрация вещества в озере. Суммарная ассимиляция вещества в озерных системах будет равна:

$$As = kC_{\text{оз}} \cdot (V_{\text{оз}} + V_{\text{сток}}) = kC_{\text{оз}} V_{\text{сток}} \cdot (\tau + 1). \quad (4)$$

Последнее уравнение является общим как для озер, так и для рек, только для последних  $t = 0$ .

При росте нагрузки на водоем будет увеличиваться и ассимиляция вещества в нем. Это имеет принципиальное значение для нормирования антропогенной нагрузки на водоем. Мы должны учитывать ассимиляционную способность водного объекта только в его природном состоянии, а не в измененном. В противном случае нагрузку можно будет увеличивать до бесконечности. Поэтому необходимо записать, что допустимая антропогенная нагрузка не должна превышать ассимиляцию вещества в природном состоянии объекта:

$$(L_{\text{антр}})_{\text{доп}} = As_{\text{прир}}. \quad (5)$$

Исходя из этого принципа возможно осуществлять нормирование антропогенной нагрузки на водные объекты.

Для того чтобы выполнить все эти расчеты, потребуются сведения по химическому балансу озера. К сожалению, полного баланса озера нет, но есть его элементы, представленные в монографии [Псковско-Чудское озеро..., 2012]. Вот некоторые данные по химическому балансу озера: поступление БЭ с речным стоком:  $P_{\text{общ}} - 712$  т/год,  $N_{\text{общ}} - 15600$  т/год; с атмосферными осадками:  $P_{\text{общ}} - 63$  т/год,  $N_{\text{общ}} - 720$  т/год; со сточными водами на водосборе озера (2001–2005 гг.):  $P_{\text{общ}} - 38,4$  т/год,  $N_{\text{общ}} - 323$  т/год. К сожалению, в работе нет оценок биогенного стока со свалок, селитебных территорий и сельскохозяйственных объектов, но поскольку все крупные города расположены в бассейне озера на реках, то в учете их химического стока нет необходимости, он включен в сток рек. То же самое относится и к сельскохозяйственным объектам. Для расчета удерживающей способности озера и константы скорости трансформации веществ используем средневзвешенные их концентрации в приточных водах и в воде озера. В приточных водах их определим по химическому стоку БЭ в озеро и по водному стоку из озера (табл. 2).

Таблица 2. Биогенные элементы в приточных ( $\overline{C}_{пр}$ ) и озерных ( $\overline{C}_{оз}$ ) водах в 2001–2005 гг.

Элемент	$\overline{C}_{пр}$ , мг/л	$\overline{C}_{оз}$ , мг/л	R	K, год <sup>-1</sup>
$P_{общ}$	0,077	0,037	0,52	0,354
Фон	0,051	0,031	-	-
$N_{общ}$	1,38	0,65	0,53	0,364
Фон	0,65	0,31	-	-

Обращают на себя внимание близкие удерживающие способности по  $P_{общ}$  и  $N_{общ}$  в Псковско-Чудском озере, хотя для карельских озер с близким периодом водообмена характерны более высокая по  $P_{общ}$  и более низкая по  $N_{общ}$  [Лозовик и др., 2011]. По азоту общему это можно объяснить тем, что в приточных водах Карелии практически нет  $NO_3^-$ , а в притоках Псковско-Чудского озера их много и, по-видимому, они являются дополнительным источником для образования  $N_{орг}$ , который в результате нитрификации переходит снова в  $NO_3^-$ . В этой же таблице приведены фоновые концентрации  $P_{общ}$  и  $N_{общ}$  в воде озера и в приточных водах.

Расчет фонового содержания  $N_{общ}$  был выполнен по данным концентраций  $N_{общ}$  и форм азота в речных водах в современный период ( $N_{общ}$  – 1,32 мг/л,  $NO_3^-$  – 0,72 мгN/л,  $NH_4^+$  – 0,09 мгN/л,  $NO_2^-$  – 0,005 мгN/л,  $N_{орг}$  – 0,51 мг/л) [Псковско-Чудское озеро..., 2012]. Значительное использование минеральных азотных удобрений в прошлом и достаточно большое в настоящее время привело к существенному выносу с полей нитратов в воды рек. Следует считать, что это нитраты антропогенного происхождения, а природная их концентрация около 0,05 мгN/л, как в воде озера в настоящее время. Природное содержание  $NH_4^+$  в речных водах гумидной зоны составляет 0,03 мгN/л,  $NO_2^-$  – 0,002 мгN/л [Лозовик, 2006]. Исходя из этого получим фоновое содержание  $N_{общ}$  в воде рек – притоков Псковско-Чудского озера:  $1,32 - 0,72 - 0,09 - 0,005 + 0,05 + 0,03 + 0,002 = 0,59$  мгN/л. С учетом атмосферных осадков оно составит 0,65 мг/л.

Что касается  $P_{общ}$ , то в монографии [Псковско-Чудское озеро..., 2012] приводится вполне реальное фоновое его содержание в воде рек – 50,6 мкг/л. С учетом осадков концентрация ( $P_{общ}$ )<sub>фон</sub> в приточных водах будет равна 55,9 мкг/л. По  $N_{общ}$  также приводится его фоновая концентрация в реках (1,32 мг/л), которая, на наш взгляд, является весьма завышенной по рассмотренным причинам.

Имеющиеся данные позволяют вычислить ассимиляционную способность водоема, природную и допустимую нагрузки на него по  $P_{общ}$  и  $N_{общ}$ , а также установить их допустимую концентрацию в озере и в приточных водах:

$$P_{общ} : As_{прир} = 31,3 \cdot 0,354 \cdot 10,07 = 112 \text{ т/год,}$$

$$L_{прир} = 55,9 \cdot 10,07 = 563 \text{ т/год,}$$

$$L_{доп} = 563 + 112 = 675 \text{ т/год, } L_{совр} = 775 \text{ т/год,}$$

$$(C_{доп})_{прит} = 67,0, (C_{оз})_{доп} = 44,1.$$

$$N_{общ} : As_{прир} = 0,31 \cdot 0,364 \cdot 10,07 = 1136 \text{ т/год,}$$

$$(L_{прир})_{прит} = 0,65 \cdot 10,07 \cdot 10^3 = 6546 \text{ т/год,}$$

$$L_{доп} = 6546 + 1136 = 7682 \text{ т/год,}$$

$$L_{совр} = 15600 \text{ т/год, } (C_{прит})_{доп} = 0,76.$$

Нормирование по ассимиляционной способности почти полностью совпадает с нормированием по принципу сохранения геохимического класса вод [Лозовик, 2006]:

$$\frac{(C_{оз})_{доп}}{(C_{прит})_{доп}} = \frac{(C_{оз})_{фон}}{(C_{прит})_{фон}} \cdot 1,58$$

Так, по указанному принципу допустимая концентрация  $P_{общ}$  в озере составит 49,5 мкг/л,  $N_{общ}$  – 0,50 мг/л.

Полученные данные свидетельствуют, что для Псковско-Чудского озера характерно превышение современной биогенной нагрузки над допустимой (фосфорной в 1,15 раза, азотной в 2 раза) и требуется ее снижение для улучшения экологического состояния озера. По  $P_{общ}$  это можно сделать за счет снижения его поступления со сточными водами путем доочистки сточных вод пищевых предприятий. Что касается  $N_{общ}$  и  $NO_3^-$ , то решить эту проблему достаточно сложно. Со временем их поступление в гидрографическую сеть озера должно снизиться за счет уменьшения использования удобрений, но этот процесс будет идти очень медленно, а возможно, начнется новая волна сельскохозяйственного использования земель в Псковской области России и в Эстонии.

## Заключение

Анализ многолетних данных по химическому составу воды Псковско-Чудского озера и его притоков показал, что озеро по совокупности химических показателей относится к мезогумусному высокощелочностному слабощелочному (весной, летом, осенью) и слабощелочному нейтральному (зимой) эвтрофному высокомутному с хорошим насыщением воды кислородом весной, летом и осенью и удовлетворительным зимой условно чистому геохимическому классу вод. По пятибалльной системе качества воды озеро имеет индексы качества воды зимой 3,8, а в другие сезоны года – 3,4, что соответствует удовлетворительному и хорошему качеству вод. Эти характеристики намного ниже, чем вод Онежского и Ладожского озер (хорошее и высокое).

Используя данные по элементам химического баланса озер, удалось установить

удерживающую способность озера по отношению к  $P_{\text{общ}}$  ( $R = 0,44$ ) и  $N_{\text{общ}}$  ( $R = 0,53$ ), а также константы скорости трансформации в озеро  $P_{\text{общ}}$  ( $k = 0,25 \text{ год}^{-1}$ ) и  $N_{\text{общ}}$  ( $k = 0,33 \text{ год}^{-1}$ ). Отмечены более низкие величины  $R$ ,  $k$  для  $P_{\text{общ}}$  и более высокие для  $N_{\text{общ}}$  по сравнению с другими озерами Северо-Запада России с близким к Псковско-Чудскому озеру периодом водообмена. Связано это с особенностями гидрохимического режима Псковско-Чудского озера. Для этого озера установлены фоновые концентрации  $N_{\text{общ}}$  в его воде ( $0,31 \text{ мг/л}$ ) и  $P_{\text{общ}}$  ( $28,3 \text{ мкг/л}$ ), а также в приточных водах ( $P_{\text{общ}} - 50,6 \text{ мкг/л}$ ,  $N_{\text{общ}} - 0,65 \text{ мг/л}$ ). Наблюдаемые концентрации в настоящее время почти в два и более раз выше фоновых, что привело к большему эвтрофированию Псковско-Чудского озера.

По скорости трансформации веществ в природном состоянии водоема удалось вычислить ассимиляционный потенциал озера ( $P_{\text{общ}} - 112 \text{ т/год}$ ,  $N_{\text{общ}} - 1136 \text{ т/год}$ ), который принимают за допустимую антропогенную биогенную нагрузку. В целом допустимые нагрузки на озеро составили:  $P_{\text{общ}} - 675 \text{ т/год}$ ,  $N_{\text{общ}} - 7682 \text{ т/год}$ , и они соответственно в 1,15 и 2 раза ниже, чем современные. Согласно допустимым нагрузкам концентрация  $P_{\text{общ}}$  в воде озера должна составлять  $49,5 \text{ мкг/л}$ ,  $N_{\text{общ}} - 0,50 \text{ мг/л}$ . Нормирование биогенной нагрузки по ассимиляционной способности озера почти в точности совпадает с нормированием по сохранению геохимического класса вод.

В качестве природоохранных мероприятий для озера следует рассматривать снижение поступления БЭ от точечных и рассеянных источников загрязнения и уменьшение содержания в воде озера взвешенных веществ.

*Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного*

*задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).*

## Литература

Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 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.

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.

Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 21–28.

Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. № 6. С. 583–588.

Лозовик П. А., Кулакова Н. Е. Методические подходы к оценке загрязнения водных объектов в зоне действия предприятий горнодобывающей промышленности // Водные ресурсы. 2014. № 4. С. 429–438.

Лозовик П. А., Морозов А. К., Зобков М. Б., Духовичева Т. А., Осипова Л. А. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в поверхностных водах Карелии // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 225–237.

Назаров Г. В. Чудско-Псковское озеро. Химический состав воды // Природные ресурсы больших озер СССР и вероятные их изменения. Л.: Гидрометеиздат, 1984. С. 110–114.

Псковско-Чудское озеро. Тарту: Eesti Loodusfoto, 2012. 495 с.

Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. 188 с.

*Поступила в редакцию 12.04.2017*

## References

Kitaev S. P. Osnovy limnologii dlya gidrobiologov i ikhtiologov [Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. 395 p.

Kondrat'ev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S., Ryabchenko V. A., Dvornikov A. Yu. Modelirovanie abioticheskikh protsessov v sisteme vodosbor – vodoem (na primere Chudsko-Pskovskogo ozera) [Modeling of abiotic processes in a catchment-reservoir system (case of Lake Peipus)]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2010. 116 p.

Lozovik P. A. Gidrogeokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ikh ustoichivosti k antropogennomu vozdeistviyu [Hydrogeochemical

criteria of surface waters conditions in a humid zone and their resistance to human impact]: DSc (Dr. of Khim.) thesis. Moscow, 2006. 56 p.

Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Sabylina A. V. Protsessy transformatsii, krugovorota i obrazovaniya veshchestv v prirodnykh vodakh [Processes of matter transformation, circulation, and formation in natural waters]. Trudy KarNTs RAN [Trans. of KarRC of RAS]. 2011. No. 4. P. 21–28.

Lozovik P. A. Geokhimicheskaya klassifikatsiya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony na osnove ikh kislotno-osnovnogo ravnovesiya [Geochemical classification of surface waters in a humid zone based on their

acid-base balance]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2013. No. 6. P. 583–588.

Lozovik P. A., Kulakova N. E. Metodicheskie podkhody k otsenke zagryazneniya vodnykh ob'ektov v zone deistviya predpriyatii gornodobyvayushchei promyshlennosti [Methodological approaches to the pollution assessment of water bodies exposed to mining companies impact]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2014. No. 4. P. 429–438.

Lozovik P. A., Morozov A. K., Zobkov M. B., Dukhovicheva T. A., Osipova L. A. Allokhthonnoe i avtokhthonnoe organicheskoe veshchestvo v poverkhnostnykh vodakh Karelii [Allochthonous and autochthonous organic matter in surface waters of Karelia]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2007. Vol. 34, no. 2. P. 225–237.

Nazarov G. V. Chudsko-Pskovskoe ozero. Khimicheskii sostav vody [Lake Peipus. Chemical composition of water]. *Prirodnye resursy bol'shikh ozer SSSR i veroyatnye ikh izmeneniya [Natural Resources of the Large Lakes in the USSR and their Probable Changes]*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. P. 110–114.

*Pskovsko-Chudskoe ozero [Lake Peipus]*. Tartu: Eesti Loodusfoto, 2012. 495 p.

*Sovremennoe sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1992–1997 gg. [Current state of the water bodies in the Republic of Karelia (according to the results of the monitoring in 1992–1997)]*. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1998. 188 p.

Received April 12, 2017

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

#### Лозовик Петр Александрович

зав. лабораторией гидрохимии и гидрогеологии, д. х. н.  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030

#### Фрумин Григорий Тевелевич

профессор, д. х. н.  
Российский государственный гидрометеорологический  
университет  
Малоохтинский пр., 98, Санкт-Петербург, Россия, 195196  
эл. почта: gfrumin@mail.ru  
тел.: (812) 2240697

### CONTRIBUTORS:

#### Lozovik, Pyotr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia

#### Frumin, Grigory

Russian State Hydrometeorological University  
98 Malookhtinsky Pr., 195196 S. Petersburg, Russia  
e-mail: gfrumin@mail.ru  
tel.: (812) 2240697