

ГИДРОХИМИЯ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

УДК 556.114.6.:556.555.8 (282.242.211)

БИОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

П. А. Лозовик¹, Г. С. Бородулина¹, Ю. В. Карпечко¹,
С. А. Кондратьев², А. В. Литвиненко¹, И. А. Литвинова¹

¹ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

² Институт озераведения РАН

На основании данных по химическому составу и объему воды источников формирования гидрохимического режима Онежского озера, а также сведений по количеству выращенной товарной форели в его бассейне приведена оценка биогенной фосфорной и азотной нагрузок на озеро, включая их отдельные составляющие от различных источников. Установлены природная и антропогенная нагрузки на озеро и выполнено сопоставление последней с ассимиляционной способностью водоема. Расчеты биогенной нагрузки по натурным данным согласуются с результатами математического моделирования с использованием модели ILLM Института озераведения РАН.

К л ю ч е в ы е с л о в а: Онежское озеро; биогенная нагрузка; речные воды; подземные воды; селитебные территории; свалки бытовых отходов; лесо- и сельскохозяйственные объекты; рыбоводческие хозяйства; ассимиляционная способность.

P. A. Lozovik, G. S. Borodulina, Yu. V. Karpechko, S. A. Kondratyev, A. V. Litvinenko, I. A. Litvinova. NUTRIENT LOAD ON LAKE ONEGO ACCORDING TO FIELD DATA

The phosphorus and nitrogen loads on Lake Onego, including individual components of the nutrients from different sources, were estimated from the data on the chemical composition and the water volume of the sources that form the hydrochemical regime of Lake Onego, and from the data on the volumes of commercial trout farming in the lake catchment. Natural and anthropogenic load on the lake was determined, and the latter was compared to the lake's assimilative capacity. Nutrient load estimates based on observed data are in good agreement with the results of mathematical modeling carried out at the Institute of Limnology RAS by means of the ILLM model.

Key words: Lake Onego; nutrient load; river water; groundwater; residential areas; municipal landfills; forestry and agricultural sites; fish farms; assimilative capacity.

Введение

Онежское озеро является вторым по величине крупнейшим пресноводным водоемом Европы. Оно испытывает антропогенное влияние вследствие поступления сточных вод, сельскохозяйственной и лесохозяйственной деятельности на его водосборе, развития форелеводства и выноса веществ со свалок и селитебных территорий. В настоящее время по содержанию общего фосфора озеро достигло верхней границы для олиготрофных водоемов, тогда как концентрации форм азота в нем остаются неизменными за многолетний период наблюдений [Сабылина, 2007]. Целью работы было установить нагрузку на озеро от различных источников поступления биогенных веществ. Количественная оценка биогенной нагрузки на озеро имеет большое практическое значение для разработки мероприятий по ее снижению и предотвращению евтрофирования водоема.

Объекты и методы исследования

Оценка биогенной нагрузки на озеро проводилась с учетом непосредственно речного притока в озеро и подземного стока с межустьевых участков, атмосферных осадков, сточных вод, сбрасываемых в озеро, стока с селитебных территорий, находящихся на побережье озера, рыбоводческих хозяйств на акватории озера (рис. 1). Для решения этой задачи были собраны данные по объему и химическому составу вод, поступавших в озеро различными путями. Отдельно рассматривалось поступление веществ от антропогенных источников, расположенных на водосборе озера.

Для оценки антропогенной составляющей в речном химическом стоке были определены фоновые концентрации биогенных элементов (БЭ). Это в конечном итоге позволило

определить нагрузку от сельско- и лесохозяйственных объектов.

Использовались данные по химическому составу воды притоков озера, полученные в 2007–2008 гг. по гидрологическим сезонам года, сведения о составе сточных вод 15 водовыпусков, химическом составе атмосферных осадков незагрязненных районов бассейна озера, а также данные по составу дренажных и ливневых вод с территории г. Петрозаводска и городской свалки бытовых отходов. Форелевые хозяйства были учтены по выносу БЭ с 1 т товарной продукции.

Все химические анализы выполнены по аттестованным методикам [Руководство..., 2009] в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН, аккредитованной в системе аккредитации аналитических лабораторий России. Достоверность химических анализов проверялась внутренним и внешним контролем. Последний осуществлялся в рамках международного проекта ICP-Waters [Intercomparison..., 2015] и внутрироссийского проекта «Межлабораторное сличение результатов анализа органического вещества и биогенных элементов в природных водах» [2015], осуществленного лабораторией в 2015 г.

Результаты и обсуждение

Водный баланс Онежского озера

В приходной части водного баланса озера основной составляющей является речной приток с водосбора (рис. 2). В среднем он составляет $17,3 \text{ км}^3$ (73 %). В маловодные годы его доля уменьшается до 65 % (1960 г.), в многоводные (1962 г.) увеличивается до 81 % общего прихода. Подземный приток с межустьевых территорий, оцененный в объеме $0,14 \text{ км}^3$, составляет менее 1 % от речного притока.



Рис. 1. Составляющие биогенной нагрузки на Онежское озеро

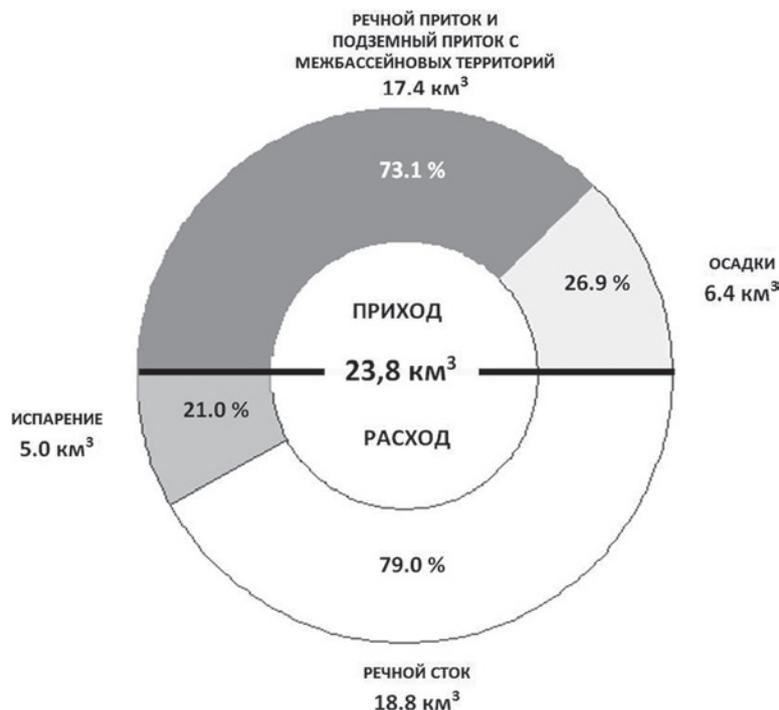


Рис. 2. Структура многолетнего водного баланса Онежского озера

Доля атмосферных осадков в приходной части баланса изменяется от 19 до 34 %. Количество осадков получено по данным наблюдений пяти прибрежных метеостанций: Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск, Пудож и Вытегра. Сток по р. Свири составляет 84 % расходной части водного баланса за многолетний период. В 1962 г. его доля составляла 91 % общего расхода, в 1960 г. – около 76 %. Испарение с акватории озера было рассчитано Ю. А. Сало по уравнению водного баланса [Онежское озеро..., 2010]. На долю испарения с водной поверхности озера приходится от 9 % (1962 г.) до 24 % (1960 г.) общего расхода воды. Период условного водообмена озера по стоку составляет 15,7 года.

Биогенный речной сток в озеро

Для расчета биогенной речной нагрузки на озеро вначале выполнялся расчет средневзвешенной по объему концентрации БЭ в каждом притоке с учетом сезонного распределения его стока. Затем рассчитывалась средневзвешенная по объему концентрация БЭ во всех притоках. Для этого использованы среднегодовое распределение стока по всем обследованным притокам и среднегодовые концентрации БЭ (табл. 1).

Так как среднегодовой сток обследованных притоков составил 14,93 км³, или 86 % от общего речного стока в озеро, то рассчитанные

средневзвешенные концентрации БЭ приняты и для необследованных притоков.

Проведенные расчеты показали, что поступление $P_{\text{общ}}$ с речным стоком в озеро составляет 656 т/год, из которого 24 % приходится на $P_{\text{мин}}$. Сток общего азота значительно больше – 10172 т/год. Превалирует $N_{\text{орг}}$ (8079 т, 79 %), на долю NH_4^+ (900 т) и NO_3^- (1159 т) приходится по 10 %. В распределении речного стока БЭ нет ничего удивительного: фактически он отражает содержание БЭ в поверхностных водах Карелии, в которых, за исключением больших стратифицированных озер, преобладает $N_{\text{орг}}$, а содержание $P_{\text{мин}}$ составляет 10–20 % от $P_{\text{общ}}$ [Лозовик, 2006].

Поступление биогенных элементов в озеро с атмосферными осадками

Атмосферные осадки играют важную роль в балансе биогенных элементов озер с большой водной поверхностью. Объем осадков, выпадающих на поверхность Онежского озера, площадь зеркала которого составляет 9840 км², достигает 6,4 км³/год. Для характеристики химических выпадений с атмосферными осадками на акваторию озера использовались данные, обобщенные в монографии [Состояние..., 2007], а также материалы последних лет наблюдений (2008–2014 гг.) (табл. 2). Следует отметить, что существенной разницы в составе осадков разных лет не наблюдается.

Таблица 1. Среднегодовой сток и среднегодовые концентрации биогенных элементов в воде притоков Онежского озера по данным наблюдений в 2007–2008 гг.

Река	Q, км³/год	ρ	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
			мкг/л		мгN/л				
Суна	0,02	0,001	65	96	0,06	0,002	0,04	0,56	0,66
Кондопожский канал	2,32	0,155	1	11	0,03	0,002	0,10	0,34	0,47
Лижма	0,28	0,019	2	12	0,03	0,002	0,03	0,46	0,52
Уница	0,13	0,009	3	22	0,06	0,002	0,07	0,48	0,61
Кумса	0,26	0,018	2	17	0,04	0,002	0,07	0,36	0,47
Вичка	0,04	0,003	2	21	0,06	0,003	0,26	0,39	0,71
Сапеница	0,05	0,003	11	48	0,05	0,002	0,14	0,48	0,67
ББК	0,35	0,023	3	34	0,06	0,001	0,02	0,36	0,44
Немина	0,29	0,020	24	59	0,06	0,001	0,04	0,50	0,60
Пяльма	0,37	0,025	8	34	0,04	0,001	0,05	0,55	0,64
Туба	0,12	0,008	3	23	0,05	0,001	0,05	0,56	0,66
Водла	4,63	0,310	8	38	0,04	0,001	0,04	0,56	0,64
Черная	0,25	0,017	23	78	0,10	0,002	0,05	0,68	0,83
Андома	1,09	0,073	13	57	0,04	0,001	0,07	0,49	0,60
Вытегра	0,58	0,039	21	72	0,05	0,007	0,17	0,40	0,62
Мегра	0,57	0,038	17	62	0,04	0,002	0,05	0,57	0,66
Водлица	0,15	0,010	10	50	0,04	0,002	0,05	0,57	0,66
Ошта	0,11	0,007	8	39	0,05	0,002	0,12	0,38	0,55
Гимрека	0,02	0,001	24	68	0,06	0,002	0,02	0,67	0,75
Рыбрека	0,01	0,001	11	55	0,06	0,003	0,10	0,66	0,82
Шокса	0,04	0,003	20	57	0,07	0,002	0,13	0,58	0,78
Пухта	0,04	0,003	12	43	0,05	0,002	0,02	0,74	0,81
Уя	0,02	0,001	4	24	0,03	0,002	0,04	0,64	0,71
Деревянка	0,03	0,002	42	73	0,05	0,005	0,19	0,60	0,84
Орзega	0,02	0,001	35	75	0,24	0,002	0,01	0,45	0,70
Нелукса	0,01	0,001	10	31	0,36	0,005	1,13	1,97	3,46
Лососинка	0,11	0,007	38	69	0,04	0,004	0,16	0,52	0,73
Неглинка	0,02	0,001	51	80	0,07	0,010	1,21	1,23	2,52
Шуя	3,00	0,201	10	41	0,09	0,001	0,06	0,37	0,52
Всего	14,93	1,000							
Средневзвешенные концентрации			9,2	37,9	0,052	0,002	0,067	0,467	0,59
Вынос (фосфор – т/год, формы N – тN/год)	17,3	1,000	159	656	900	34,6	1159	8079	10172

Примечание. ρ – доля водного стока; P_{общ} – общее содержание всех форм фосфора в нефилтрованных пробах воды.

Таблица 2. Содержание и выпадение биогенных элементов с атмосферными осадками на территорию Карелии

Район	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
	мкг/л		мгN/л				
Центральный	1	10	0,075	0,001	0,18	0,06	0,32
Южный	3	8	0,114	0,001	0,24	0,06	0,41
Восточный	1	11	0,107	0,001	0,18	0,04	0,33
Среднее	2	10	0,10	0,001	0,20	0,05	0,35
Выпадения (P – т/год, формы N – тN/год)	12,8	64,0	640	6,4	1280	320	2246
% от общих форм	19	100	29	0,3	57	14	100

Как видно из табл. 2, выпадение $P_{\text{общ}}$ составляет 64 т/год, $N_{\text{общ}}$ – 2240 т/год. С атмосферными осадками поступает значительное количество нитратов (57 % от $N_{\text{общ}}$), на втором месте находится NH_4^+ (29 %) и на третьем – $N_{\text{орг}}$ (14 %). Таким образом, в выпадениях с осадками преобладают минеральные формы азота, а не органические, как это имеет место в поверхностных водах Карелии, в том числе и в притоках Онежского озера.

Водный и биогенный подземный сток в озеро, минуя речную сеть

В расчете водного и химического баланса озер Карелии, в том числе и Онежского озера, приход подземных вод количественно учтен в объеме среднемноголетнего речного стока [Иешина и др., 1987]. Прямой же приток подземных вод с прибрежной территории, не подверженной дренирующему воздействию рек и ручьев, не принимался во внимание. Но именно в этой части водосборной площади озер располагаются основные очаги загрязнения подземных вод: урбанизированные и сельскохозяйственные территории, свалки, карьеры и другие хозяйственные объекты.

В пределах основных водоносных комплексов побережья озера выделены участки со сходными гидрогеологическими условиями, в пределах которых гидродинамическим методом рассчитаны расходы потоков подземных вод, направленных непосредственно в озеро, минуя речную сеть. Этим методом рассчитан общий подземный сток в Онежское озеро в объеме 140,3 млн $\text{м}^3/\text{год}$ [Бородулина, 2011]. Для оценки загрязненного подземного (грунтового) стока была выделена общая ширина фронта потока с селитебных прибрежных территорий (152 км), что составляет 8,4 % от

общей длины береговой линии озера. Загрязненный сток формируется в верхней гидрогеохимической зоне, средняя мощность водоносных отложений составила 10 м, средние коэффициенты фильтрации для озерно-ледниковых и ледниковых супесчаных отложений принимались 0,3 м/сут, для флювиогляциальных – 4 м/сут, средний гидравлический уклон 0,01. Расчетный подземный сток с селитебных территорий составил 3,21 млн $\text{м}^3/\text{год}$.

Для расчета загрязненного грунтового стока с селитебных территорий приняты средние величины содержания биогенных соединений в колодцах и родниках населенных пунктов прибрежной зоны озера. Для расчета поступления с природной части водосбора приняты региональные медианные концентрации соединений азота и фосфора. В отличие от фоновых территорий, где содержание азотных соединений невысокое (0,01–0,1 мгN/л), в пределах населенных пунктов нитратное загрязнение часто достигает значительной интенсивности и даже критической (>10 мгN/л), средняя концентрация составляет 8,14 мгN/л (табл. 3). Источником нитратного загрязнения являются хозяйственно-бытовые отходы [Лозовик, Бородулина, 2009].

Содержание фосфора в подземных водах изменяется в широком диапазоне (от микрограммовых количеств до 4 мг/л), но в целом низкое и сравнимо с фоновыми концентрациями в поверхностных водах (17 мкг/л) [Лозовик, 2006]. В отличие от поверхностных вод, в которых преобладающей формой является органо-железосвязанный фосфор, в подземных ведущая роль принадлежит минеральным формам [Бородулина, 2012]. Средние концентрации $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$ в пробах грунтовых вод селитебной территории составили 25 и 19 мкг/л соответственно.

Таблица 3. Вынос азота с подземным стоком в Онежское озеро

Расчетные территории	Водный сток, млн $\text{м}^3/\text{год}$	NO_3^-		NO_2^-		NH_4^+		Всего N, т/год
		С, мгN/л	Вынос, т/год	С, мгN/л	Вынос, т/год	С, мгN/л	Вынос, т/год	
Загрязненные	3,2	8,14	26,1	0,02	<0,1	0,07	0,2	26,4
Природные	137,1	0,11	15,1	0,01	1,4	0,13	17,8	34,3
Вся территория стока	140,3	0,29	41,2	0,01	1,4	0,13	18,0	60,7

Таблица 4. Вынос фосфора с подземным стоком в Онежское озеро

Расчетные территории	Водный сток, млн $\text{м}^3/\text{год}$	$P_{\text{мин}}$		$P_{\text{общ}}$	
		С, мкг/л	Вынос, т/год	С, мкг/л	Вынос, т/год
Загрязненные	3,2	19	<0,1	25	<0,1
Природные	137,1	13	1,8	17	2,3
Вся территория стока	140,3	13	1,8	17	2,4

Результаты расчета выноса биогенных элементов с подземным стоком представлены в табл. 3 и 4.

На основании проведенных расчетов установлено, что, несмотря на относительно небольшое количество загрязненных подземных вод (2 %), поступающих непосредственно в озеро, вынос азота с ними сравним с его поступлением с остальной прибрежной территории. Поступление фосфора происходит в основном с природных территорий.

Биогенный сток от точечных источников загрязнения

При расчете биогенного стока от точечных источников загрязнения учитывалось, что часть сточных вод поступает через водовыпуски непосредственно в озеро, а часть – в водные объекты, расположенные на его водосборе. Точечные источники загрязнения, расположенные на водосборе, учитываются в химическом стоке рек, а расположенные на побережье следует принимать во внимание при оценке внешней биогенной нагрузки на водоем. Для объективной оценки биогенной нагрузки от точечных источников загрязнения необходимо брать данные по водоотведению за 2007–2008 гг., поскольку речной сток оценен

для этого периода. Следует отметить, что объем сточных вод в настоящее время существенно сократился по сравнению с 2007–2008 гг. в связи с введением контроля коммунального водопотребления, экономного расхода воды потребителями и ряда социально-экономических причин. Что касается данных о химическом составе сточных вод, то здесь существует большая проблема. К сожалению, данные статистичности «2ТП-водхоз» для расчета использовать нельзя. Во-первых, в них отсутствуют сведения по содержанию $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$, необходимые для оценки биогенной нагрузки на озеро. Во-вторых, нет уверенности в достоверности значений содержания остальных контролируемых элементов. Поэтому в работе использованы данные по составу сточных вод, полученные ИВПС КарНЦ РАН.

В целом в бассейне Онежского озера было обследовано 15 выпусков сточных вод, составляющих 71 % от общего объема водоотведения. Из числа обследованных выпусков в 12 имеются биологические очистные сооружения, в 3 пунктах (г. Медвежьегорск, о. Кижы и ТЭЦ г. Петрозаводска) сточные воды сбрасываются без очистки. Судя по результатам определения органического вещества, взвешенных веществ и БЭ (табл. 5), в 7 пунктах биологические очистные сооружения работают неэффективно,

Таблица 5. Содержание биогенных элементов в сточных водах

Сточные воды населенных пунктов	ρ^*	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	$N_{\text{орг}}$	$N_{\text{общ}}$
		мкг/л		мгN/л				
г. Кондопога, ОАО «Кондопога»	0,686	300	665	0,36	0,009	6,7	8,6	15,7
г. Петрозаводск, ОАО «Петрозаводские коммунальные системы»	0,265	3984	4256	4,4	0,120	19,2	1,6	25,3
пос. Пудож, ООО «Пудожское ВХК»	0,008	6037	6768	73,2	0,001	0,02	8,0	81,2
г. Медвежьегорск, ООО «Водоканал»	0,012	3543	4462	22,7	<0,001	0,01	12,6	35,3
о. Кижы, Пожарная часть № 14	0,004	9	9	0,03	0,001	0,03	0,7	0,76
г. Петрозаводск, ТЭЦ	0,003	149	426	0,05	<0,001	0,82	1,4	2,3
пос. Марциальные Воды ООО «Санаторий Марциальные воды»	0,003	675	825	21,8	0,048	15,8	2,4	40,0
пос. Шуя, ОАО «Петрозаводские коммунальные системы»	0,001	6112	6487	61,5	0,126	16,5	3,4	80,5
пос. Новая Вилга, ОАО «Петрозаводские коммунальные системы»	0,001	5615	6524	46,6	0,001	0,27	6,3	53,2
пос. Мелиоративный, ОАО «Петрозаводские коммунальные системы»	0,002	53	459	4,6	0,139	8,1	1,6	16,2
пос. Пиндуши, ООО «Водоканал»	0,006	2775	3394	26,3	0,001	<0,01	10,1	36,4
пос. Матросы, ООО «Рубин»	0,001	3872	4040	43,3	0,004	13,0	3,8	60,1
пос. Эссойла, ЗАО «Эссойла»	0,001	4612	4594	39,6	0,463	6,3	5,7	52,1
пос. Деревянка, ОАО «Петрозаводские коммунальные системы»	0,001	1612	1996	23,9	0,023	16,6	1,9	42,4
г. Суоярви, ООО «Экотехнология»	0,004	1238	1364	0,42	0,059	23,5	5,7	29,7
Средневзвешенные концентрации		1399	1699	2,7	0,04	9,9	6,7	19,34

Примечание. ρ^* – доля сточных вод в общем объеме обследованных источников.

Таблица 6. Биогенная нагрузка в бассейне Онежского озера от точечных источников загрязнения

Сточные воды	объем, тыс. м³/год	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
		т/год		тN/год				
Прямой сброс в озеро	102576	144	174	277	4,1	1016	687	1984
Фон		0,6	2,9	4,1	0,2	3,1	42,1	49,4
Истинное значение		143	171	273	3,9	1013	645	1935
На водосборе	39085	54,6	66,4	106	1,6	387	262	757
Фон		0,2	1,1	1,6	0,1	1,2	16,0	18,8
Истинное значение		54,4	65,3	104	1,5	386	246	738
Всего	141661	199	240	383	5,7	1403	949	2741
Истинное значение		197	236	377	5,4	1399	891	2673
% от общих форм по истинным значениям		83	100	14	0,2	52	33	100

Таблица 7. Химический состав дренажных и ливневых вод г. Петрозаводска

Объекты	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{общ}
	мкг/л		мгN/л		
Ручей Студенец	21	70	0,08	3,79	14,40
Труба по ул. Мелентьевой	94	135	0,35	3,14	5,66
Труба по ул. Московской	133	160	0,40	2,71	5,22
Труба по ул. Еремеева	100	110	0,07	2,52	6,03
Остальные водовыпуски (средние значения по 5 выпускам)	40	66	0,16	0,76	2,50
Средняя концентрация	78	108	0,21	2,58	6,76

а правильнее будет сказать – вообще не работают. Так, величина БПК₅ в этих выпусках достигала 13–184 мгO₂/л, содержание NH₄⁺ – 23–73 мгN/л, а NO₃⁻ – до 6 мгN/л, взвешенных веществ – 88–350 мг/л. Более низкое содержание NO₃⁻ по сравнению с NH₄⁺ наряду с высокими значениями БПК₅ и содержанием взвешенных веществ свидетельствует об отсутствии аэробной очистки сточных вод.

На основании химического состава сточных вод и их объема (по средним данным за 2007 и 2008 гг.) было рассчитано поступление БЭ в бассейн Онежского озера от точечных источников загрязнения, расположенных на побережье озера и его водосборе, сток от которых поступает в озеро с речными водами. В расчетах учтен вклад фонового поступления БЭ в сточные воды, которое определялось по природным концентрациям БЭ в речных водах. По разности общего и фонового оценивалось собственно антропогенное поступление от точечных источников (табл. 6). Для оценки суммарного объема сточных вод, поступающих на водосбор Онежского озера и непосредственно в озеро, использовались данные статистической отчетности «2ТП-водхоз» за 2007–2008 гг. для Карелии и Вытегорского района Вологодской обл.

Как видно из таблицы 6, поступление БЭ непосредственно в озеро со сточными водами более чем в 3 раза выше, чем с водосбора, поскольку 72 % от общего водоотведения

приходится на промышленные центры, расположенные на побережье озера (Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск, Пиндуши). Сток P_{общ} от всех точечных источников загрязнения составил 236 т/год, а N_{общ} – 2673 т/год. Доля минеральных форм в поступлении P_{общ} составляет 83 %, а в стоке N_{общ} превалирует NO₃⁻ (52 %) и N_{орг} (33 %), на NH₄⁺ приходится 14 %, а на сток NO₂⁻ – менее 1 %.

Биогенный сток с селитебных территорий

Для оценки биогенного стока с селитебных территорий использовались данные по химическому составу дренажных и ливневых вод с территории г. Петрозаводска [Современное состояние..., 1998] (табл. 7). Для остальных селитебных территорий на водосборе озера использовались эти же данные, поскольку обследование их не проводилось.

Для селитебных территорий также необходимо отдельно рассчитывать сток с прибрежных участков, с которых он поступает непосредственно в озеро, и с водосбора озера в речную сеть. Объем стока с селитебных территорий на побережье озера (площадь 144,4 км², население 328 тыс. человек, средний слой стока 388 мм) равен 56 027 тыс. м³. Условно принимая для остальной части бассейна с численностью населения 62 тыс. человек плотность застройки аналогично городской, получаем значение площади селитебных территорий

Таблица 8. Биогенный сток с селитебных территорий в бассейне Онежского озера

Селитебные территории	V, тыс. м ³ /год	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
		т/год		тN/год				
Расположенные на побережье	56027	4,4	6,1	11,8	0,6	145	222	379
Фон		0,3	1,6	2,2	0,1	1,7	23,0	27,0
Истинное значение		4,1	4,5	9,6	0,5	143	199	352
Расположенные на водосборе	9770	0,8	1,1	2,1	0,1	25,2	38,8	66,2
Фон		0,1	0,3	0,4	0,02	0,3	4,0	4,7
Истинное значение		0,7	0,8	1,7	0,1	24,9	34,8	61,5
Всего	65797	5,2	7,2	13,9	0,7	170	261	445
Истинное значение		4,8	5,3	11,3	0,6	168	234	414
% от общих форм по истинным значениям		91	100	3	0,1	41	57	100

Таблица 9. Биогенные элементы в воде р. Нелуксы и мелиоративной канавы

Объект	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
	мкг/л		мгN/л				
Мелиоративная канава	301	526	3,20	0,50	15,0	9,8	28,5
р. Нелукса (исток из оз. Уварово)	27	89	0,22	0,001	0,01	0,27	0,50
р. Нелукса (ниже впадения мелиоративной канавы)	7	31	0,79	0,046	3,69	1,32	5,85
р. Нелукса (устье)	3	22	0,03	0,001	0,66	0,89	1,58

Таблица 10. Биогенный сток со свалок в бассейне Онежского озера

Нагрузка	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
	т/год		тN/год				
Общая	1,2	2,1	12,6	2,0	59,1	38,6	112
Фон	0,02	0,1	0,16	0,01	0,12	1,6	1,9
Истинное значение	1,2	2,0	12,4	2,0	59,0	37,0	110
% от общих форм по истинным значениям	60	100	11	2	54	34	100

27,1 км². Тогда сток с селитебных территорий на водосборе при среднем слое стока 360 мм составит 9770 тыс. м³.

Слой стока (Y) с селитебных территорий определялся по уравнению водного баланса для многолетнего периода ($Y = P - E$), при этом суммарное испарение (E) определялось с учетом влияний различных элементов территорий [Карпечко, 2004], а осадки (P) – по ближайшим метеостанциям. Разница в слоях стока с селитебных территорий побережий (388 мм) и с территорий, расположенных на остальной части водосбора (360 мм), обусловлена в основном различием в количестве осадков.

С учетом фоновых концентраций в речных водах рассчитано антропогенное поступление БЭ с селитебных территорий в бассейне Онежского озера (табл. 8). Его величина относительно невелика: P_{общ} – 5,3 т/год, N_{общ} – 414 т/год. В стоке P_{общ} 91 % приходится на P_{мин}, а в стоке N_{общ} – 57 % на N_{орг} и 41 % на NO₃⁻. Незначительны доли NH₄⁺ (3 %) и NO₂⁻ (0,1 %). Такая картина распределения в стоке форм азота является закономерной, поскольку дренажные и ливневые воды с селитебных территорий

хорошо насыщены кислородом и процесс нитрификации в них заканчивается образованием нитратов.

Водный и биогенный сток с территории свалок

В бассейне Онежского озера находятся в основном свалки бытовых и строительных отходов. Промышленных свалок практически нет в связи с незначительными объемами производства. Поскольку сток со свалок поступает в основном в речную сеть, то их влияние рассматривается только на водосборе, и оно опосредованно учитывается в биогенном стоке рек.

Слой стока с территории свалки вблизи г. Петрозаводска составляет 350 мм. Эта величина была получена при осреднении стока расположенных вблизи города рек, на которых проводятся наблюдения за расходом воды. Для остальной территории водосбора Онежского озера слой стока можно принять равным 322 мм. Данное значение получено при осреднении стока всех изученных рек водосбора Онежского озера.

Таблица 11. Поступление биогенных элементов от форелеводческих хозяйств в бассейне Онежского озера

Расположение хозяйств	Товарная продукция, т	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
		т/год		тN/год			
На акватории озера	3213	19,3	25,7	20	20	121	161
На водоемах водосбора	2535	15,2	20,3	16	16	95	127
Всего	5748	34,5	46,0	36	36	216	288

Таблица 12. Поступление биогенных элементов в Онежское озеро

Источник	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
	т/год		тN/год				
Речные воды	159	657	900	34,6	1159	8079	10173
Атмосферные осадки	12,8	64,0	640	6,4	1280	320	2246
Подземные воды	1,9	2,4	18	1,4	41,2	-	60,6
Сточные воды	144	174	277	4,1	1016	687	1984
Селитебные территории	4,4	6,1	11,8	0,6	145	222	379
Форелевые хозяйства	15,2	20,3	20	-	20	121	161
Итого	337	924	1867	47,1	3661	9429	15004
% от общих форм	36	100	12	0,3	24	63	100
Средневзвешенная концентрация в приточных водах (по стоку из озера) (P – мкг/л, формы N – мгN/л)	17,9	49,1	0,10	0,003	0,20	0,50	0,80
Удерживающая способность озера (R)	0,89	0,79	0,80	-	-	0,70	0,35

Данные по составу дренажных вод, поступающих со свалки г. Петрозаводска в мелиоративную канаву, и воды их водоприемника – р. Нелуксы, впадающей в Онежское озеро, приведены в таблице 9.

Наибольшее влияние свалки сказывается на химическом составе воды мелиоративной канавы, тогда как при впадении ее в р. Нелуксу показатели существенно уменьшаются и к устью становятся близкими к речным водам бассейна. Площадь водосбора мелиоративной канавы до точки отбора пробы составила 7,94 км², а объем стока – 2778 тыс. м³. Для всего бассейна условный объем стока с территории свалок рассчитан пропорционально численности населения: 2778 · 390 / 275 = 3940 тыс. м³. Такое приближение обусловлено отсутствием данных по другим свалкам на водосборе Онежского озера. В таблице 10 приведен расчетный вынос БЭ с территории свалок в бассейне Онежского озера.

В сравнении с общим речным биогенным стоком с территории свалок поступает незначительное количество биогенных элементов. В стоке P_{общ} доля минерального составляет 60 %, а в стоке N_{общ} доминируют NO₃⁻ (54 %). Меньшую долю составляют N_{орг} (34 %) и NH₄⁺ (11 %), на NO₂⁻ приходится всего 2 %.

Поступление биогенных элементов от рыбоводческих хозяйств

В Карелии в последние годы получило бурное развитие товарное рыбоводство на

внутренних водоемах (преимущественно форелеводство). По объему производимой продукции Карелия занимает первое место в России. Так, в 2014 г. было выращено 15,8 тыс. т товарной форели, в том числе на акватории Онежского озера 4,5 тыс. т и на водоемах его бассейна 3,5 тыс. т. Поскольку речной биогенный сток оценен для 2007–2008 гг., то и объем выращивания форели принят для этих лет (3213 т/год на акватории озера и 2535 т/год на водоемах его бассейна). Для оценки биогенной нагрузки от форелеводческих хозяйств использованы данные выноса БЭ с 1 т товарной продукции (8 кг P_{общ} и 50 кг N_{общ}), полученные авторами [Китаев и др., 2006] по пяти методикам. Эти величины близки к рекомендациям ХЕЛКОМ: 7 кг P_{общ} и 50 кг N_{общ} на 1 т товарной продукции [HELCOM..., 2007]. К сожалению, в обоих случаях отсутствуют данные по выносу отдельных форм БЭ. Чтобы получить единую со всеми рассмотренными антропогенными источниками картину по стоку БЭ, примем, что на P_{мин} и N_{орг} приходится 75 % от общих форм, а на NH₄⁺ и NO₃⁻ – 25 % в равных долях. Результаты выполненных расчетов с учетом распределения форм БЭ приведены в таблице 11. Итоговая величина выноса от форелеводческих хозяйств в 2007–2008 гг. P_{общ} составила 40 т/год, N_{общ} – 288 т/год.

Биогенная нагрузка на Онежское озеро

Для достоверной оценки биогенной нагрузки на водоем требуется информация по

поступлению веществ от всех источников формирования химического состава воды. Применительно к Онежскому озеру у нас имеются данные по поступлению БЭ с речными водами, атмосферными осадками, со сточными и подземными водами, поступающими непосредственно в озеро, с прибрежных селитебных территорий и от рыбоводческих хозяйств, расположенных на акватории озера. В речном химическом стоке отражается поступление БЭ не только с неосвоенных территорий, но и от всех антропогенных источников, расположенных на его водосборе, в том числе и от сельскохозяйственных объектов. В таблице 12 представлено поступление БЭ в Онежское озеро от всех указанных выше источников.

В целом поступление $P_{\text{общ}}$ в озеро составляет 924 т/год, а $N_{\text{общ}}$ – 15004 т/год. Наибольшее количество БЭ приносят речные воды (около 70 %) и наименьшее – подземные воды, разгружающиеся непосредственно в озеро (<1 %). Существенный вклад в баланс $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{орг}}$ вносят сточные воды (19 % от всего стока $P_{\text{общ}}$ и 13 % от стока $N_{\text{общ}}$) и атмосферные осадки (7 % $P_{\text{общ}}$ и 15 % $N_{\text{общ}}$). В общем стоке доля $P_{\text{мин}}$ выше, чем в речном, и составляет 36 % $P_{\text{общ}}$, а в общем стоке $N_{\text{общ}}$ отмечается более высокая доля минеральных форм (NO_3^- – 24 %, NH_4^+ – 12 %) и меньшая органических (63 %), чем в речном стоке (79 %).

Имеющиеся данные по балансу БЭ позволяют оценить удерживающую способность озера (R) по этим элементам: $R = (C_{\text{прит}} - C_{\text{оз}}) / C_{\text{оз}}$, где $C_{\text{прит}}$ и $C_{\text{оз}}$ – средневзвешенная концентрация вещества в приточных водах и в озере соответственно. Под приточными водами в данном случае понимаются все виды вод, поступающие в озеро (речные, подземные, сточные, дренажные, ливневые, атмосферные осадки).

Наибольший интерес представляет удерживающая способность озера к $P_{\text{общ}}$, как основному лимитирующему биогенному элементу, и $N_{\text{орг}}$, как главному компоненту, отражающему трансформацию соединений азота в озере. Содержание NO_3^- в озере выше, чем в приточных водах, и это связано с превращением $N_{\text{орг}}$ в нитраты в ходе процессов аммонификации и нитрификации. Органическое вещество в озере представлено автохтонным и аллохтонным ОВ, в состав которых входит $N_{\text{орг}}$. При образовании автохтонного ОВ потребляются в основном нитраты. Поэтому удерживающую способность озера к $N_{\text{орг}}$ следует рассматривать по отношению к $N_{\text{орг}}$, входящему в состав аллохтонного ОВ. Учитывая, что доля аллохтонного ОВ в озере составляет 60 %, примем эту величину и за долю аллохтонного $N_{\text{орг}}$. Тогда концентрация $N_{\text{орг}}$ аллохтонного происхождения составит

0,15 мг/л, а удерживающая способность к азоту в аллохтонном ОВ: $R = 0,70$.

Используя формулу связи удерживающей способности с периодом водообмена озера (τ) и константой скорости трансформации веществ (k) в озере $R = k\tau / (1 + k\tau e^{-1/\tau})$ [Лозовик, 2015а], можно рассчитать указанную константу и ассимиляцию вещества в водоеме (As): $As = kC_{\text{оз}}V_{\text{стока}}(\tau + 1)$ [Лозовик, 2015б]. Выполненные расчеты дали следующие значения: $k(P_{\text{общ}}) = 0,194 \text{ год}^{-1}$, $k(N_{\text{орг}})_{\text{алл}} = 0,130 \text{ год}^{-1}$, $As(P_{\text{общ}}) = 624 \text{ т/год}$, $As(N_{\text{орг}})_{\text{алл}} = 6122 \text{ т/год}$.

На основании проведенных расчетов установлено, что в год в озерной котловине ассимилируется 624 т $P_{\text{общ}}$ (67 % от его внешнего поступления), а азота органического – 6122 т (65 %). Таким образом, благодаря внутриводоемным процессам существенно снижается концентрации $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$, поступающих в озеро с приточными водами.

Согласно полученным константам скорости трансформации $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{орг}}$, периоды полупревращения этих элементов составляют 3,6 и 5,3 года соответственно. Установленные значения указывают, что трансформация соединений фосфора и азота в речных водах происходит очень медленно, и можно с полной уверенностью считать, что БЭ, которые поступают от антропогенных источников в речную сеть на водосборе озера, привносятся в Онежское озеро практически без изменения.

Биогенная нагрузка на Онежское озеро от сельскохозяйственных объектов

Оценка биогенной нагрузки на озеро от сельскохозяйственных объектов и других видов хозяйственной деятельности на водосборе, основанная на показателях выноса БЭ от различных источников, в настоящее время является достаточно сложной задачей. Сказанное объясняется недостаточностью и труднодоступностью исходной информации, необходимой для выполнения расчетов. Преодолеть возникшие сложности с информационным обеспечением и оценить биогенную нагрузку на Онежское озеро без использования данных государственной статистической отчетности можно на основе косвенного метода оценки нагрузки, разработанного в ИВПС КарНЦ РАН и базирующегося на балансовых соотношениях с учетом знания фоновой составляющей нагрузки.

Для определения фонового содержания $P_{\text{общ}}$ в притоках озера воспользуемся геохимической классификацией водных объектов по их щелочности и гумусности [Лозовик, 2013]. Для различных классов гумусности и щелочности

Таблица 13. Геохимическая классификация притоков Онежского озера и фоновые концентрации $P_{\text{общ}}$ в их воде по данным наблюдений в 2007–2008 гг.

Река	Alk, мгHCO ₃ ⁻ /л	Hum	Геохимический класс	$P_{\text{общ}}$ набл.	$P_{\text{общ}}$ фон
				мкг/л	
Суна	51,2	37	мезополигумусный среднещелочностной	96	35
Кондопожский канал	8,6	26	мезогумусный среднещелочностной	11	11*
Лижма	21,6	20	мезогумусный среднещелочностной	12	12*
Уница	12,6	70	мезополигумусный среднещелочностной	22	22*
Кумса	19,6	33	мезогумусный среднещелочностной	17	17*
Вичка	29,5	35	мезополигумусный среднещелочностной	21	21*
Сапеница	20,9	66	мезополигумусный среднещелочностной	48	35
ББК	9,7	41	мезополигумусный среднещелочностной	34	34*
Немина	10,2	60	мезополигумусный среднещелочностной	59	35
Пяльма	21,8	70	мезополигумусный среднещелочностной	34	34*
Туба	21,5	52	мезополигумусный среднещелочностной	23	23*
Водла	14,0	56	мезополигумусный среднещелочностной	38	35
Черная	24,6	97	полигумусный среднещелочностной	78	48
Андома	22,2	68	мезополигумусный среднещелочностной	57	35
Вытегра	113,5	28	мезогумусный высокощелочностной	72	30
Мегра	45,6	68	мезополигумусный среднещелочностной	62	35
Водлица	16,7	72	мезополигумусный среднещелочностной	50	35
Ошта	55,5	43	мезополигумусный среднещелочностной	39	35
Гимрека	15,1	95	полигумусный среднещелочностной	68	48
Рыбрека	14,6	81	полигумусный среднещелочностной	55	48
Шокша	27,0	73	полигумусный среднещелочностной	57	48
Пухта	17,3	71	мезополигумусный среднещелочностной	43	35

Примечание. *Для рек, у которых фоновые концентрации $P_{\text{общ}}$ по геохимическим классам воды были выше наблюдаемых, в качестве фоновых принимались последние.

установлены фоновые концентрации $P_{\text{общ}}$ для природных поверхностных вод Карелии (рис. 3) [Лозовик, 2006].

С использованием фоновых концентраций $P_{\text{общ}}$ для различных притоков Онежского озера (табл. 13) установлена фоновая средневзвешенная по объему концентрация $P_{\text{общ}}$ в притоках озера, которая составляет 30,1 мкг/л.

Второй способ расчета средневзвешенной фоновой концентрации $P_{\text{общ}}$ в притоках может быть выполнен по удерживающей способности и по фоновой концентрации $P_{\text{общ}}$ в озере (6 мкг/л). Тогда средневзвешенная фоновая концентрация $P_{\text{общ}}$ в приточных водах составит 28,6 мкг/л, а фоновое количество $P_{\text{общ}}$

в притоках озера, рассчитанное по объему стока из озера (18,8 км³/год) за вычетом его выпадений с осадками и поступлений с подземными водами, равно 471,2 т/год. Расчетная фоновая концентрация $P_{\text{общ}}$ в речных водах (приток 17,3 км³/год) составит 27,2 мкг/л.

Средняя фоновая концентрация $P_{\text{общ}}$ в притоках Онежского озера по двум вариантам расчета 28,7 мкг/л. За фоновую концентрацию $P_{\text{мин}}$ примем 20 % от $P_{\text{общ}}$ (5,7 мкг/л).

Что касается определения фоновых концентраций форм азота, то здесь ситуация более сложная, чем с $P_{\text{общ}}$. По вышеуказанной классификации вод не получено существенных отличий в их распределении. Поэтому приходится

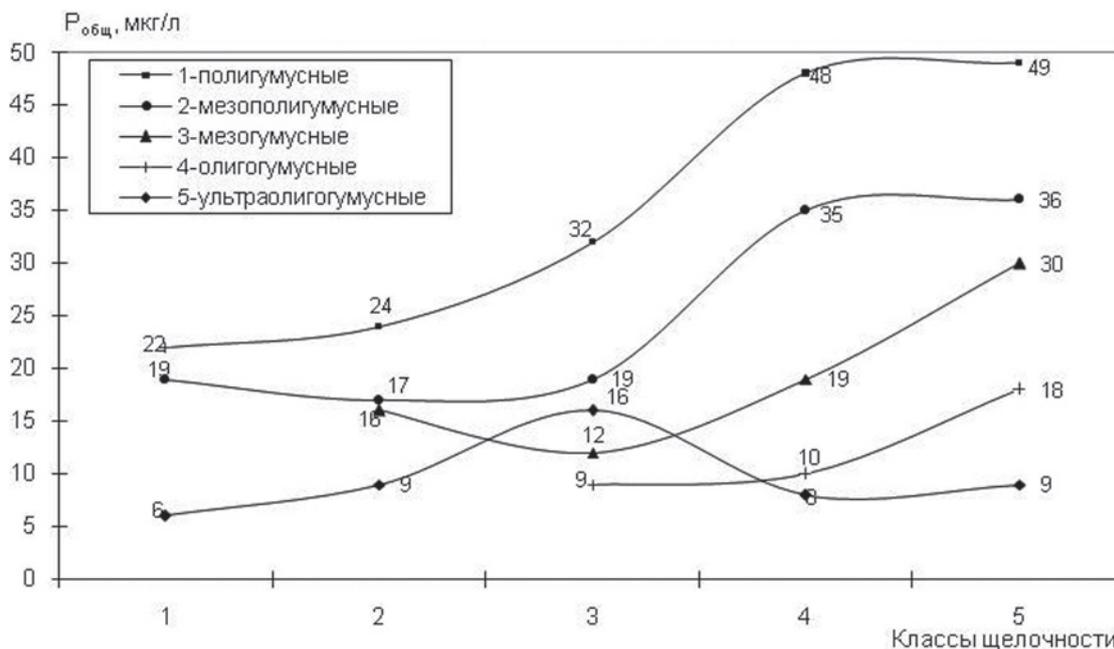


Рис. 3. Распределение средних значений содержания $P_{\text{общ}}$ по классам гумусности и щелочности. Классы щелочности и рН: 1 – бесщелочностные кислоты, 2 – низкощелочностные слабокислые кислоты, 3 – слабощелочностные слабокислые, 4 – среднещелочностные циркумнейтральные, 5 – слабощелочностные слабощелочные

ориентироваться на геохимические особенности поверхностных вод Карелии. Для чистых незагрязненных рек известно среднее содержание, мгN/л: NH_4^+ – 0,04; NO_2^- – 0,002; NO_3^- – 0,03 [Лозовик, 2006]. Низкое содержание NH_4^+ обусловлено тем, что скорость нитрификации выше, чем скорость аммонификации [Рыжаков, 2012], поэтому в воде, насыщенной кислородом, не происходит накопления NH_4^+ . Повышенные концентрации NO_2^- (>5 мкгN/л) в природных водах также маловероятны, поскольку скорость II стадии нитрификации ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$) выше скорости I стадии ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$). Содержание $N_{\text{орг}}$ в природных водах зависит в первую очередь от количества органического вещества, поэтому использование среднерегionalных концентраций $N_{\text{орг}}$ для притоков Онежского озера не является оправданным. Единственный выход – попытаться рассчитать фоновую концентрацию $N_{\text{орг}}$ в притоках по удерживающей способности озера к этому элементу. За природную фоновую концентрацию ($N_{\text{орг}}^{\text{алл}}$) примем его содержание в воде озера в современный период (0,15 мг/л). Это является вполне обоснованным, поскольку в озере наблюдаются стабильные и постоянные концентрации форм азота. Антропогенное влияние на озеро не привело еще к изменению содержания соединений азота [Сабылина, 2007].

По аналогии с расчетом фоновой концентрации $P_{\text{общ}}$ по удерживающей способности получим величину фоновой концентрации $N_{\text{орг}}$

в приточных водах (0,50 мг/л). Тогда общее поступление $N_{\text{орг}}$ с приточными водами (объем 18,8 км³) составит 9400 т/год, а с вычетом поступлений с атмосферными осадками и подземным стоком – 7093 т. Фоновая концентрация в речных водах (объем 17,3 км³) составит 0,41 мг/л. В отличие от расчета фоновой концентрации фосфора для азота в атмосферных осадках и подземных водах принималось его общее содержание с допущением, что минеральные формы в озере перейдут в органическую. Фоновую концентрацию $N_{\text{общ}}$ в речных водах определим как сумму фоновых концентраций форм азота: $0,04 (\text{NH}_4^+) + 0,002 (\text{NO}_2^-) + 0,03 (\text{NO}_3^-) + 0,41 (N_{\text{орг}}) = 0,482$ мг/л. Установленные фоновые концентрации БЭ в речных водах позволяют оценить природный биогенный речной сток в озеро, и в конечном итоге, используя балансовый метод, удастся вычислить нагрузку от сельско- и лесохозяйственных объектов. Биогенная нагрузка от последних рассчитана как разность между общим биогенным речным стоком и суммой его составляющих (табл. 14).

Расчеты показали, что антропогенный вынос $P_{\text{общ}}$ с сельско- и лесохозяйственных объектов на водосборе составляет 70 т/год (11 % от речного стока), а $N_{\text{общ}}$ – 988 т/год (10 %). Полученные значения оказались достаточно низкими, указанные объекты дают небольшой вклад в общую биогенную нагрузку на озеро, поскольку сельское хозяйство в бассейне

Таблица 14. Биогенный сток с сельско- и лесохозяйственных объектов

Источник	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	$N_{\text{орг}}$	$N_{\text{общ}}$
	т/год		тN/год				
Сток	159	656	900	34,6	1159	8079	10175
в том числе:							
1. Природный речной сток	86,5	497	692	17,3	519	6920	8148
2. Сточные воды	54,4	65,3	104	1,5	386	246	738
3. Селитебные территории	0,8	1,1	1,7	0,1	24,9	34,8	61,5
4. Свалки	1,2	2,1	12,4	2,0	59,0	37,0	110
5. Форелевые хозяйства	15,2	20,3	16	-	16	95	127
Всего	158,1	585,8	826,1	20,9	1005	7333	9187
Сельско- и лесохозяйственные объекты	0,9	70,2	73,9	13,7	154	746	988
% от общих форм	1	100	7	1	16	76	100

Онежского озера развито слабо, количество земель сельскохозяйственного назначения невелико (около 5 % от площади водосбора), а лесное хозяйство слабо отражается на выносе веществ.

Низкую роль леса в формировании биогенной нагрузки на озеро можно объяснить тем, что количество потребляемых древесиной питательных веществ из почвы на прирост фитомассы превышает их возврат с опадом на протяжении длительного периода роста и развития леса [Казимиров и др., 1977]. Эта разница не компенсируется, как показали наши предварительные расчеты, поступлением минеральных веществ с атмосферными осадками. Значительное количество БЭ закрепляется в фитомассе древостоя. Некоторого увеличения биогенной нагрузки можно ожидать в первый год после сплошных рубок. Однако площадь ежегодных рубок составляет менее 1 % всей лесопокрытой части водосбора, и предварительные оценки показали, что на вынос биогенных веществ заметного влияния это воздействие не оказывает. В частности, после удаления соснового и елового древостоя в объемах расчетной лесосеки (объем вырубаемого леса) увеличение выноса общего фосфора может составить соответственно от 0 до 22 т, а общего азота – от 25 до 80 т со всего водосбора.

Гидротехническая мелиорация для целей сельского и лесного хозяйства также не может существенно повлиять на поступление биогенных элементов в озеро, поскольку после ее проведения прошло около 30 лет. Выполненный анализ показал [Карпечко, 2004], что наиболее интенсивный преобразовательный процесс при гидроресомелиорации, которой охвачено около 5 % площади водосбора Онежского озера, продолжается не более 10 лет. В дальнейшем функционирование лесного биогеоценоза осуществляется уже на новом уровне его

развития, и в настоящее время формирование водного и химического стока на осушаемых болотах и заболоченных землях происходит так же, как и на остальных участках леса.

Оценка современной диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро с выделением ее естественной и антропогенной составляющих

Полученные в предыдущих разделах данные позволяют оценить современную диффузную биогенную нагрузку на Онежское озеро от природных и антропогенных источников. К природным отнесен диффузный вынос веществ с водосборной территории, находящейся в естественном состоянии, который можно рассчитать по фоновым концентрациям БЭ в притоках и объему речного стока в озеро. Кроме того, необходимо учитывать поступление БЭ с подземными водами, разгружающимися непосредственно в озеро. К диффузным природным источникам отнесены и атмосферные выпадения БЭ, поскольку для их расчета использовались данные по химическому составу атмосферных осадков Карелии на территориях, удаленных от промышленных центров.

К антропогенным диффузным источникам поступления БЭ отнесены селитебные территории, свалки бытовых и промышленных отходов, форелевые хозяйства, сельско- и лесохозяйственные объекты на водосборе озера (рис. 1).

Оценка диффузного поступления БЭ с водосборной территории Онежского озера выполнена для $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ (табл. 15).

Результаты оценки свидетельствуют, что для Онежского озера диффузное поступление БЭ связано в основном с природными источниками (около 85 %, как по $P_{\text{общ}}$, так и по $N_{\text{общ}}$). Роль антропогенных источников незначительная (менее 20 % от диффузной нагрузки $P_{\text{общ}}$

Таблица 15. Диффузная биогенная нагрузка на Онежское озеро с водосборной территории

Вид нагрузки	P _{общ}		N _{общ}	
	т/год	%	т/год	%
Природная, в том числе	567	85	10491	86
– речной сток	497	72	8148	67
– атмосферные осадки	64	9	2240	18
– подземные воды	2,3	0,3	34,3	0,3
– техногенные воды (фон)	4,0	0,6	68,2	0,6
Антропогенная, в том числе	97,8	15	1665	14
– селитебные территории	5,3	0,8	440	3,2
– свалки	2,0	0,3	110	0,2
– форелевые хозяйства (на водосборе)	20,3	3	127	1
– сельско- и лесохозяйственные объекты	70,2	10	988	8
Общая диффузная нагрузка по натурным данным	670	100	12156	100
Общая диффузная нагрузка по модели ILLM (50 % обеспеченности) (данные ИНОЗ РАН)	669		11981	

и N_{общ}). В природную диффузную нагрузку наибольший вклад вносят речные воды (88 % по P_{общ} и 78 % по N_{общ} от природной нагрузки). Существенна роль и атмосферных осадков (11 % по P_{общ} и 21 % по N_{общ} от природной нагрузки). Что касается антропогенных источников, то наибольший вклад вносят сельско- и лесохозяйственные объекты (72 % по P_{общ} и 59 % по N_{общ} от антропогенной нагрузки этими элементами), форелевые хозяйства по P_{общ} (21 % от антропогенной нагрузки) и селитебные территории по N_{общ} (25 % от антропогенной нагрузки). К сожалению, отдельно установить вынос БЭ с сельско- и лесохозяйственных объектов не представляется возможным в связи с отсутствием необходимой информации.

Кроме того, в рамках исследований биогенной нагрузки на Онежское озеро проведены работы по моделированию формирования нагрузки общим азотом и общим фосфором от рассеянных источников. Расчеты выполнялись с использованием модели ILLM–*Institute of Limnology Load Model*, разработанной в Институте озероведения РАН на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования стока и выноса биогенных веществ с водосборных территорий [Кондратьев и др., 2011], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [Guidelines..., 2005]. Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой биогенной нагрузки, сформированной точечными и рассеянными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений. Модель ориентирована на существующие ограниченные возможности информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов Роскомгидромета и структур государственной статистической отчетности о сбросах

сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах РФ.

Нагрузка общим фосфором и общим азотом на водоем-водоприемник (L) со стороны водосбора рассчитывалась как сумма биогенной нагрузки на гидрографическую сеть водосбора, сформированную сельхозпредприятиями (L_{agr}), и нагрузку, сформированную естественными и антропогенными ландшафтами, не подверженными в настоящее время сельскохозяйственному воздействию (L_c). Кроме того, в формировании нагрузки принимают участие точечные источники загрязнения, сточные воды которых поступают в гидрографическую сеть (L_{p1}) и непосредственно в водоем-водоприемник (L_{p2}) [Кондратьев и др., 2011]:

$$L = (L_{agr} + L_c + L_{p1})(1 - R) + L_{p2},$$

где R – безразмерный коэффициент удержания гидрографической сетью водосбора. Все остальные члены уравнения имеют размерность [т/год].

В качестве источника информации о площадях различных типов подстилающей поверхности, которые характеризуются различными значениями потока азота и фосфора с поверхностным стоком, удалось использовать результаты дешифрирования космических снимков, находящихся в режиме свободного доступа. Для распознавания типов поверхностей использовались данные семи каналов космического аппарата Landsat-8 (видимого и ближнего инфракрасного диапазонов съемки) и данные двух каналов космического аппарата Terra/MODIS. Идентифицировались следующие типы подстилающей поверхности: леса; поля; луга; болота; селитебные зоны, свалки и заброшенные территории; водные объекты. Значения стока азота и фосфора с указанных типов подстилающей поверхности задавались по результатам данных натурных исследований на

Таблица 16. Природная и антропогенная нагрузка на Онежское озеро

Вид нагрузки	P _{общ}		N _{общ}	
	т/год	%	т/год	%
Природная	567	61	10491	70
Антропогенная, в том числе	359	39	4499	30
– от точечных источников	236	25	2673	18
– от рассеянных источников	123	13	1826	12
Общая нагрузка	926	100	14990	100

водосборах северо-запада России [Кондратьев и др., 2011].

По результатам математического моделирования установлено, что поступление P_{общ} в бассейн Онежского озера от рассеянных источников составляет 669 т/год, а N_{общ} – 11981 т/год. Расчет биогенной нагрузки по натурным данным (табл. 15) хорошо согласуется с результатами моделирования, что свидетельствует о достоверности обоих методов оценки.

Сравнение значений диффузной нагрузки с другими составляющими общей нагрузки

Данные по природным и антропогенным биогенным нагрузкам на Онежское озеро представлены в таблице 16.

Природная фосфорная нагрузка составляет 567 т/год, а азотная – 10491 т/год, или 61 и 70 % от их общей нагрузки соответственно. Общая фосфорная и азотная нагрузки равняются 926 и 14990 т/год соответственно (некоторое расхождение значений по сравнению с табл. 13 связано с округлением данных). Точечные источники дают в 1,5–1,9 раза больший вклад в общую биогенную нагрузку, чем рассеянные. Полученная картина в распределении различных видов биогенной нагрузки в бассейне Онежского озера является вполне закономерной и отражает хозяйственную деятельность в его бассейне. Более высокая плотность населения в бассейне озера, чем в других районах Карелии, обуславливает значительное поступление сточных вод. Слабое развитие сельского хозяйства приводит к незначительному поступлению БЭ от сельскохозяйственных источников загрязнения. В то же время в бассейне озера получает активное развитие рыбководство, вследствие чего диффузная нагрузка от этого источника увеличивается. Наглядным примером этого может быть Ладожское озеро, на территории бассейна которого сельское хозяйство развито в большей степени, чем в бассейне Онежского озера, и биогенная нагрузка от сельскохозяйственных объектов доминирует над другими видами антропогенного влияния, причем нагрузка от

форелевых хозяйств превысила нагрузку от точечных источников загрязнения.

Выводы

С использованием натуральных данных по химическому составу и объему воды от различных источников формирования гидрохимического режима Онежского озера, а также сведений по количественному выращиванию товарной форели в его бассейне удалось надежно определить биогенную фосфорную и азотную нагрузку на озеро (P_{общ} – 926 т/год, N_{общ} – 14990 т/год), включая их отдельные составляющие (речной биогенный сток, поступление веществ с атмосферными осадками, подземными водами, с селитебных территорий, со свалок, рыбководческих хозяйств, сельско- и лесохозяйственных объектов). Результаты расчета биогенной нагрузки хорошо согласуются с данными математического моделирования.

Антропогенная нагрузка по P_{общ} составляет 359 т/год, или 39 % от общей нагрузки, и озеро исчерпало свой самоочистительный потенциал по этому элементу. По N_{общ} антропогенная составляющая (4500 т/год) достигла 30 % от общей азотной нагрузки, и она меньше природной ассимиляционной способности озера. Большой вклад в антропогенную биогенную нагрузку на озеро дают точечные источники загрязнения, чем рассеянные, поэтому в первую очередь требуется снижение поступления общего фосфора со сточными водами.

Литература

Бородулина Г. С. Роль подземного стока в формировании химического состава поверхностных вод Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 108–116.

Бородулина Г. С. Биогенные элементы в подземных водах Карелии и их поступление с подземным стоком в озеро // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием (10–14 сентября 2012 г. Петрозаводск, Республика Карелия). Петрозаводск, 2012. С. 254–258.

Иешина А. В., Поленов И. К., Богачев М. А. и др. Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1987. 151 с.

Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С. и др. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.

Карпечко Ю. В. Гидрологическая оценка антропогенного воздействия на водосборы в таежной зоне Европейского Севера России: автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Петрозаводск, 2004. 49 с.

Китаев С. Н., Ильмаст Н. В., Стерлигова О. П. Методы оценки биогенной нагрузки от форелевых ферм на водные экосистемы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. 38 с.

Кондратьев С. А., Казмина М. В., Шмакова М. В., Маркова Е. Г. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты // Региональная экология. 2011. № 3–4. С. 50–59.

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., Бородулина Г. С. Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 694–704.

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. Оценка состояния и загрязнения водных объектов и нормирование допустимой антропогенной нагрузки на них с учетом процессов, происходящих в водной среде // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод: материалы научной конференции с международным участием. Ч. 2 (Ростов-на-Дону, 8–10 сентября 2015 г.). Ростов-на-Дону, 2015а. С. 252–256.

Лозовик П. А. Процессы формирования химического состава поверхностных вод гумидной зоны // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Труды Четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием, Москва, 15–18 сентября 2015 г. М.: ИВП РАН, 2015б. С. 178–181.

Межлабораторное сличение результатов анализа органического вещества и биогенных элементов в природных водах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 66 с.

Онежское озеро. Атлас / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Руководство по химическому анализу вод суши. Ч. 1. Ростов-на-Дону: НОК, 2009. 1045 с.

Рыжаков А. В. Кинетические характеристики трансформации азотсодержащих соединений в природной воде // Экологическая химия. 2012. Т. 21, вып. 2. С. 117–124.

Сабылина А. В. Онежское озеро и его притоки // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. С. 17–40.

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

Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). HELCOM Publ. Helsinki, Finland. 2005. 80 p.

HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2007. 103 p.

Intercomparison 1529: pH, Conductivity, Alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni, and Zn. Oslo: Norwegian Institute for Water Research, September 2015. 86 p.

Поступила в редакцию 10.02.2016

References

Borodulina G. S. Rol podzemnogo stoka v formirovanihi himicheskogo sostava poverhnostnyh vod Karelii [Role of groundwater flow in formation of the chemical composition of lake water]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN [Trans. KarRC of RAS]*. 2011. No. 4. P. 108–116.

Borodulina G. S. Biogennye elementy v podzemnyh vodah Karelii i ih postuplenie s podzemnym stokom v ozera [Nutrients in groundwater of Karelia and their runoff into lakes]. *Organicheskoe veshhestvo i biogennye jelementy vo vnutrennih vodoemah i morskikh vodah: Materialy V Vserossijskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem [Organic matter and biogenic elements in inland waters and marine waters: Proc. 5th all-Russian Symposium with intern. participation]*. September 10–14, 2012, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia. Petrozavodsk. 2012. P. 254–258.

Ieshina A. V., Polenov I. K., Bogachev M. A., Terukov V. S. i dr. Resursy i geohimija podzemnyh vod Karelii [Resources and geochemistry of ground waters of Karelia]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1987. 151 p.

Kazimirov N. I., Volkov A. D., Zjabchenko S. S., Ivanchikov A. A., Morozova R. M. Obmen veshhestv i jenergii v sosnovyh lesah Evropejskogo Severa [Metabolism and energy exchange in pine forests of the European North]. Leningrad: Nauka, 1977. 304 p.

Karpechko Ju. V. Gidrologicheskaja ocenka antropogennogo vozdejstvija na vodosbory v taehnoj zone Evropejskogo Severa Rossii [Hydrological assessment of anthropogenic impact on the watersheds in the taiga zone of Russian European North]: Summary of PhD (Dr. of Geogr.) thesis. Petrozavodsk, 2004. 49 p.

Kitaev S. N., Il'mast N. V., Sterligova O. P. Metody ocenki biogennoj nagruzki ot forelevykh ferm na vodnye jekosistemy [Methods for assessing biogenic loads from trout farms on aquatic ecosystems]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2006. 38 p.

Kondratyev S. A., Kazmina M. V., Shmakova M. V., Markova E. G. Metod rascheta biogennoj nagruzki na vodnye objekty [A method for calculation of the nutrient load on water bodies]. *Regional'naya ekologiya [Regional ecology]*. 2011. No. 3–4. P. 50–59.

Lozovik P. A. Hidrogeohimicheskie kriterii sostojanija poverhnostnyh vod gumidnoj zony i ih ustojchivosti k antropogennomu vozdejstvu [Hydrogeochemical criteria of surface water condition in humid areas and their resistance to human impact]: Summary of PhD (Dr. of Chem.) thesis. Moscow, 2006. 56 p.

Lozovik P. A., Borodulina G. S. Soedinenija azota v poverhnostnyh i podzemnyh vodah Karelii [Nitrogen compounds in the surface and subsurface waters of Karelia]. *Vodnye resursy* [Water resources]. 2009. Vol. 36, no. 6. P. 694–704.

Lozovik P. A. Geohimicheskaja klassifikacija poverhnostnyh vod gumidnoj zony na osnove ih kislotno-osnovnogo ravnovesija [Geochemical classification of surface waters in humid zone based on their acid-base equilibrium]. *Vodnye resursy* [Water resources]. 2013. No. 6. P. 583–588.

Lozovik P. A. Ocenka sostojanija i zagrjaznenija vodnyh objektov i normirovanie dopustimoj antropogennoj nagruzki na nih s uchetom processov, proishodjashih v vodnoj srede [State estimation and pollution of water objects and rationing of permissible anthropogenic load with account of processes happening in aquatic environment]. Materialy nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Sovremennye problemy gidrohimii i monitoringa kachestva poverhnostnyh vod" [Proc. sci. conf. with intern. participation "Current problems of hydrochemistry and monitoring of surface water quality"]. Part 2. September 8–10, 2015 in Rostov-on-Don. Rostov-on-Don, 2015a. P. 252–256.

Lozovik P. A. Processy formirovanija himicheskogo sostava poverhnostnyh vod gumidnoj zony [The processes of formation of surface water chemical composition in humid zone]. Fundamentalnye problemy vody i vodnyh resursov [Fundamental problems of water and water resources]: Proc. 4th all-Russian sci. conf. with intern. participation, Moscow, Russia, 15–18 September 2015. Moscow: IWP RAS, 2015b. P. 178–181.

Mezhlaboratornoe slichenie rezultatov analiza organicheskogo veshhestva i biogennyh jelementov v prirodnyh vodah [Interlaboratory comparison of analysis of organic substances and biogenic elements in natural waters]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2015. 66 p.

Onezhskoe ozero. Atlas [Lake Onega. Atlas]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2010. 151 p.

Rukovodstvo po himicheskomu analizu vod sushi [Manual for chemical analysis of land surface waters]. Part 1. Rostov-on-Don: NOK, 2009. 1045 p.

Ryzhakov A. V. Kineticheskie karakteristiki transformacii azotsoderzhashih soedinenij v prirodnoj vode [Kinetic parameters of the transformation of nitrogen-containing compounds in natural water]. *Ekologicheskaya himiya* [Ecological chemistry]. 2012, Vol. 21, iss. 2. P. 117–124.

Sabylina A. V. Onezhskoe ozero i ego pritoki [Lake Onega and its tributaries]. Sostojanie vodnyh objektov Respubliki Karelija. Po rezultatam monitoringa 1998–2006 gg. [The state of water bodies of the Republic of Karelia based on monitoring results of 1998–2006]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. P. 17–40

Sovremennoe sostojanie vodnyh objektov Respubliki Karelija. Po rezultatam monitoringa 1992–1997 gg. [The present-day state of water bodies of the Republic of Karelia according to the results of monitoring of 1992–1997]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1998. 188 p.

Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water) HELCOM Publ. Helsinki, Finland. 2005. 80 p.

HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2007. 103 p.

Intercomparison 1529: pH, Conductivity, Alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni, and Zn. Norwegian Institute for Water Research, Oslo. September 2015. 86 p.

Received February 10, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лозовик Петр Александрович

зав. лабораторией гидрохимии и гидрогеологии, д. х. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

Бородулина Галина Сергеевна

старший научный сотрудник, к. г.-м. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН,
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: bor6805@yandex.ru
тел.: +79114094171

CONTRIBUTORS:

Lozovik, Petr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576541

Borodulina, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: bor6805@yandex.ru
tel.: +79114094171

Карпечко Юрий Васильевич

ведущий научный сотрудник, д. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: karp@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 578569

Кондратьев Сергей Алексеевич

зам. директора по научной работе, д. ф.-м. н.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
эл. почта: kondratyev@limno.org.ru
тел.: (812) 3870276

Литвиненко Александр Васильевич

старший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: litvinenko@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: +79212239383

Литвинова Ирина Абрамовна

инженер-исследователь
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: litvinovoi@rambler.ru
тел.: +79535284996

Karpechko, Yury

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: karp@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 578569

Kondratyev, Sergey

Institute of limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia
e-mail: kondratyev@limno.org.ru
tel.: (812) 3870276

Litvinenko, Alexander

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: litvinenko@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: +79212239383

Litvinova, Irina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: litvinovoi@rambler.ru
tel.: +79535284996