

## ОЦЕНКА БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ФИНСКИЙ ЗАЛИВ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ С РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ ВОДОСБОРА

© 2011 г. С. А. Кондратьев

*Институт озерадения Российской Академии наук  
199105 Санкт Петербург, ул. Севастьянова, 9*

Поступила в редакцию 28.12.2009 г.

Оценена биогенная нагрузка на Финский зал. Балтийского моря, которая включает вынос биогенных веществ из Ладожского оз. со стоком р. Невы, из Чудско-Псковского оз. и Нарвского водохранилища со стоком р. Нарвы, с частного водосбора Финского залива, а также сбросы сточных вод Санкт-Петербурга. Используются данные государственного мониторинга водных объектов и государственной статистической отчетности по северо-западу России, материалы ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», результаты предшествующих научных исследований формирования качества воды в Ладожском оз., Финском зал. и на их водосборе, а также результаты расчетов биогенной нагрузки на залив с использованием модели Института озерадения РАН. В настоящее время годовая биогенная нагрузка на Финский зал. с Российской территории составляет ~5200 т  $P_{\text{общ}}$  и 70800 т  $N_{\text{общ}}$ . Фосфорная нагрузка превосходит допустимые значения, рекомендованные Хельсинкской комиссией, что является поводом для поиска реальных путей снижения нагрузки в будущем.

*Ключевые слова:* Финский залив, водосбор, общий азот, общий фосфор, биогенная нагрузка.

Внешняя нагрузка на водный объект — количество вещества, поступившего в водоем за рассматриваемый интервал времени, пересчитанное на единицу площади акватории или объем водной массы. Впервые понятие нагрузки было введено в 1947 г. при исследовании зависимости трофического статуса водоема от поступающих в него  $P$  и  $N$  [11]. Нагрузка — постоянно действующий фактор, определяющий качество воды в водоеме, влияющий на химический состав донных отложений и гидробиологические процессы. По отношению к источникам формирования внешняя нагрузка разделяется на точечную и рассредоточенную. Точечная нагрузка формируется за счет сбросов очищенных и неочищенных сточных вод промышленных, муниципальных и сельскохозяйственных предприятий. Рассредоточенная нагрузка формируется за счет выноса веществ со всей площади водосбора; это эмиссия химических веществ из почв, смыв поверхностных загрязнений. Кроме того, можно выделить нагрузку естественного и антропогенного происхождения. Основной источник естественной нагрузки — вынос химических веществ с естественных ландшафтов (лесов, болот, лугов естественного происхождения и др.) под воздействием дождевого и талого стоков. Антропогенная составляющая складывается из сбросов сточных вод промышленных, муниципальных и сельскохозяйственных предприятий, а также выноса растворенных и взвешенных примесей с сельскохозяйственных угодий, пашни, пастбищ, удобряемых и заброшенных территорий.

Финский зал. — одна из наиболее евтрофированных акваторий Балтийского моря. На долю Российской Федерации в 1997–2003 гг. приходилось  $>3/4 P$  и  $>2/3 N$ , поступающих с водосбора в Финский зал. [6]. В ноябре 2007 г. на сессии Хельсинкской комиссии (ХЕЛКОМ) принят План действий по Балтийскому морю (ПДБМ) [7], который представляет собой долгосрочную стратегию оздоровления Балтийского моря. Одно из важнейших направлений ПДБМ — разработка мероприятий по снижению поступления в морскую экосистему общего фосфора  $P_{\text{общ}}$  и общего азота  $N_{\text{общ}}$ , способствующих нежелательному евтрофированию. ПДБМ предполагает в будущем установление платы за избыточное поступление биогенных веществ в Балтийское море от каждой страны. Для Финского зал. Балтийского моря определены максимально возможные биогенные нагрузки в размере 4860 т  $P_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup> и 106680 т  $N_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>. Требования к снижению нагрузки на Балтийское море сформулированы по результатам расчетов, проведенных по модели MARE NEST [7].

Цель настоящего исследования — расчет внешней нагрузки  $P_{\text{общ}}$  и  $N_{\text{общ}}$  на Финский зал. Балтийского моря с Российской территории водосбора, выявление вклада различных источников загрязнения в биогенную нагрузку и оценка соответствия современных нагрузок на залив требованиям ПДБМ.

Основное внимание в работе уделяется количественной оценке среднегодовых нагрузок общими (валовыми) формами биогенных элементов, так как

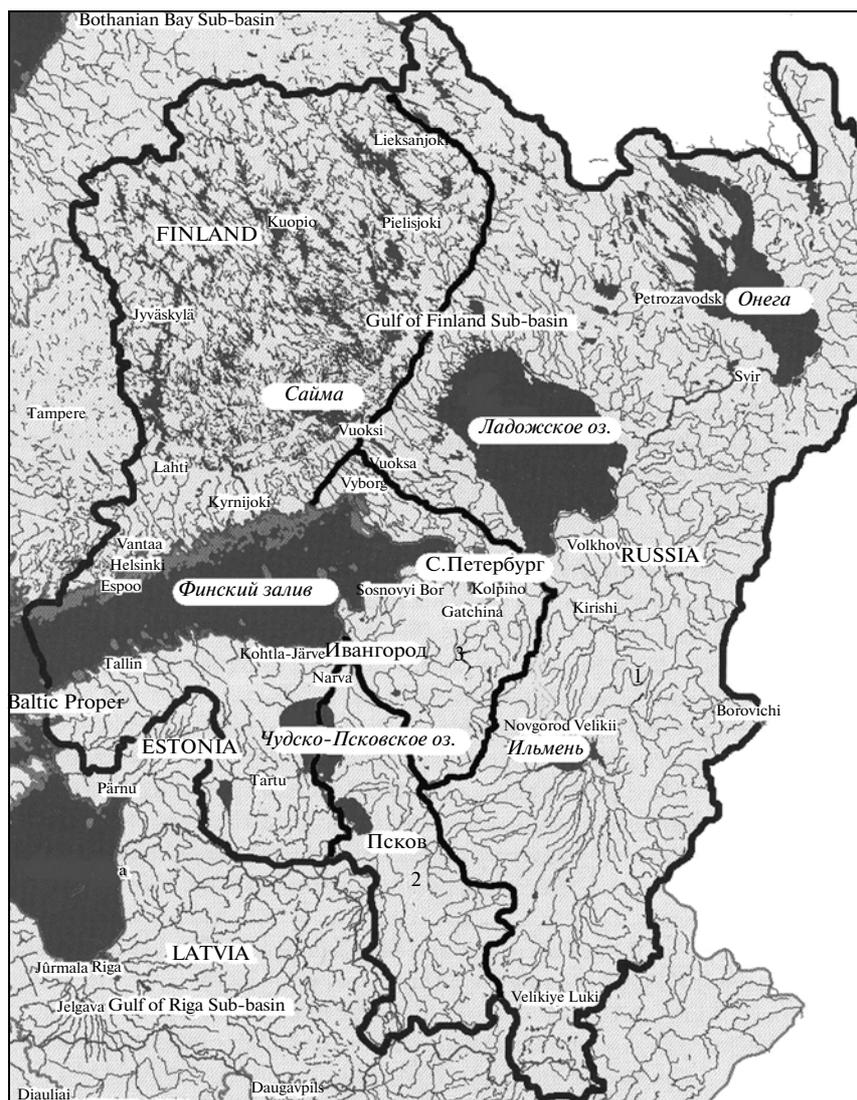


Рис. 1. Карта-схема водосбора Финского зал.: водосбор Ладожского оз. – 1; Чудско-Псковского оз., р. Нарвы и Нарвского водохранилища – 2; частный водосбор Финского зал. – 3.

именно такие оценки лежат в основе ПДБМ. В тоже время, при описании крупных водоемов Российского водосбора Финского зал., формирующих значительную часть биогенной нагрузки, приводятся сведения о внутригодовой динамике содержания  $P_{\text{общ}}$  и  $N_{\text{общ}}$ , соотношении общих и неорганических форм, а также значения критерия  $N : P$ , характеризующего трофность водоема.

Анализ условий формирования нагрузки на Финский зал. со стороны Российской части водосбора позволяет сделать вывод о том, что только ~11% его площади непосредственно участвуют в формировании нагрузки на Финский зал. (рис. 1). Это частный водосбор Финского зал. (~29000 км<sup>2</sup>), включающий город Санкт-Петербург, водосборы р. Невы (от истока из Ладоги до устья), р. Луги, малых притоков северного и южного побережья зали-

ва. Остальная часть Российской территории бассейна Финского зал. – водосбор Ладожского озера, включающий водосборы озер Онежского и Ильмень (~200000 км<sup>2</sup>), а также Чудско-Псковского оз., р. Нарвы и Нарвского водохранилища (~35000 км<sup>2</sup>).

Таким образом, для Российской территории водосбора можно выделить четыре основных источника биогенной нагрузки на Финский зал., которые и рассматриваются в настоящей работе: вынос биогенных веществ из Ладожского оз. со стоком р. Невы, из Чудско-Псковского оз. и Нарвского водохранилища со стоком р. Нарвы, с частного водосбора Финского зал., сбросы сточных вод Санкт-Петербурга.

Для количественной оценки биогенной нагрузки на залив с Российской территории использовались результаты государственного мониторинга и

государственной статистической отчетности по северо-западу России, материалы ГУП “Водоканал Санкт-Петербурга”, обеспечивающего очистку сточных вод Санкт-Петербурга, результаты предшествующих научных исследований формирования качества воды в Ладожском оз., Финском зал. и на их водосборе, а также математическая модель формирования биогенной нагрузки на залив, разработанная в Институте озерадения РАН.

### ВЫНОС БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ЛАДОЖСКОГО ОЗ. СО СТОКОМ Р. НЕВЫ

Ладожское оз. площадью 17870 км<sup>2</sup>, объемом водной массы 838 км<sup>3</sup>, со средней и максимальной глубинами 47 и 230 м соответственно — крупнейшее озеро Европы и десятое в мире по запасу пресной воды [1]. Водосборный бассейн озера площадью ~280000 км<sup>2</sup> расположен на территории трех государств: России (80% общей площади), Финляндии (19.9%) и Белоруссии (0.1%). В пределах России он размещен в семи субъектах Федерации: Ленинградской области (39% площади Российской части водосбора), Карелии (29), Новгородской (17), Псковской (6), Тверской (4), Вологодской (3) и Архангельской (2%) областей. Ладожское оз. — безальтернативный источник питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга с его почти пятидесяти миллионным населением. На водосборе расположены такие крупные озера как Сайма (Финляндия), Онега и Ильмень (Россия), связанные с Ладогой реками Вуокса, Свирь и Волхов. Сток из Ладожского оз. происходит по р. Неве, его средний многолетний расход воды ~2500 м<sup>3</sup> сек<sup>-1</sup>.

Водосборная территория Ладожского оз. характеризуется относительно высоким уровнем развития промышленности и сельского хозяйства, ~600 крупных промышленных предприятий и 680 животноводческих и птицеводческих комплексов расположены на Российской части водосбора. В конце 1970-х—начале 1980-х гг. внешняя нагрузка  $P_{\text{общ}}$ , определяющая трофический статус, составляла 0.38–0.45 г Р м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>, что соответствовало критическому для Ладожского оз. значению, при котором возможен переход озера в эвтрофное состояние. В дальнейшем поступление Р снижалось, в 1980-х гг. — главным образом, благодаря совершенствованию промышленных технологий и эффективности природоохранных мероприятий, а с начала 1990-х гг. — в связи с экономическими причинами, снижением сельскохозяйственного и промышленного производств. В последние годы нагрузка  $P_{\text{общ}}$  на Ладожское оз. достигла значений 0.16–0.23 г м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>, что соответствует биогенной нагрузке, свойственной мезотрофным водоемам. Внешняя нагрузка  $N_{\text{общ}}$  на Ладожское оз. за период с 1976 по 2003 г. находилась в пределах от 2.9 до 4.3 г м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>. Средняя за год концентрация  $N_{\text{общ}}$  в воде притоков составляла 650–850 мкг л<sup>-1</sup>. В отличие от Р, тренд в сторону

снижения выноса N в озеро в 1990-е гг. практически не прослеживается [5].

Избыточное поступление Р в Ладожское оз. с конца 1960-х гг. привело к резкому увеличению его содержания в воде и развитию процесса антропогенного эвтрофирования. В дальнейшем в результате проведения водоохранных мероприятий на водосборе поступление Р в озеро снизилось, уменьшилась и концентрация его в воде водоема. Если в среднем за 1976–1980 гг. содержание  $P_{\text{общ}}$  в воде озера было равно 26 мкг л<sup>-1</sup>, то в 2001–2006 гг. средняя концентрация  $P_{\text{общ}}$  составляла 14 мкг л<sup>-1</sup>. Отчетливого тренда в изменении содержания  $N_{\text{общ}}$  (600–700 мкг л<sup>-1</sup>) в воде озера за период с 1980 г. по настоящее время не прослеживается.

В настоящее время средние значения содержания биогенных веществ в Петрокрепостной бух., откуда вытекает р. Нева, соединяющая озеро с Финским зал., составляют для общих форм — 18 мкг Р л<sup>-1</sup> и 650 мкг N л<sup>-1</sup>, для неорганических форм — 5 мкг Р л<sup>-1</sup>, азота — 200 мкг N л<sup>-1</sup>. Внутригодовая изменчивость концентраций биогенных веществ в озерной воде характеризуется максимумом в зимний период ( $P_{\text{общ}}$  до 25 мкг л<sup>-1</sup>,  $N_{\text{общ}}$  до 700 мкг л<sup>-1</sup>) и минимумом в летний период ( $P_{\text{общ}}$  до 15 мкг л<sup>-1</sup>,  $N_{\text{общ}}$  до 550 мкг л<sup>-1</sup>). Значение весового соотношения N : Р составляет 36, что подтверждает мезотрофный статус Петрокрепостной бух., водные массы которой активно участвуют в формировании биогенной нагрузки на Финский зал. [5].

Крупные водоемы, расположенные на водосборе Ладожского оз., — геохимический барьер на пути миграции биогенных веществ с верховий водосбора в Балтийское море. Как показано в работе [8], озера Сайма, Онега и Ильмень удерживают соответственно 71, 76 и 53% фосфорной нагрузки со стороны водосбора. Удержание Р в самом Ладожском оз. составляет ~70% поступившего извне  $P_{\text{общ}}$ . Следовательно, эффективность воздействия любых мероприятий, связанных с изменением нагрузки в верховьях водосбора, на биогенную нагрузку на Финский зал. будет мала.

Результаты расчета основных составляющих биогенного баланса Ладожского оз., выполненные для 1980–2005 гг. [9], показывают, что наиболее значимые компоненты — поступление  $N_{\text{общ}}$  и  $P_{\text{общ}}$  со стоком рек (приходная часть), удержание в озере и вынос со стоком р. Невы (расходная часть), представляющий первостепенный интерес для настоящего исследования (рис. 2). Согласно приведенным данным вынос  $P_{\text{общ}}$  из Ладожского оз. сначала увеличился с 2140 в 1980 г. до 2940 т год<sup>-1</sup> в 1982 г., а затем снизился до 1180 т год<sup>-1</sup> в 2005 г. Вынос  $N_{\text{общ}}$  за рассмотренный период уменьшился незначительно и составлял 40000–50000 т год<sup>-1</sup> в зависимости от водности года. В 2007–2008 гг. вынос биогенных веществ из Ладожского оз. со стоком р. Невы составил ~1000 т  $P_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup> и 40100 т  $N_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>.

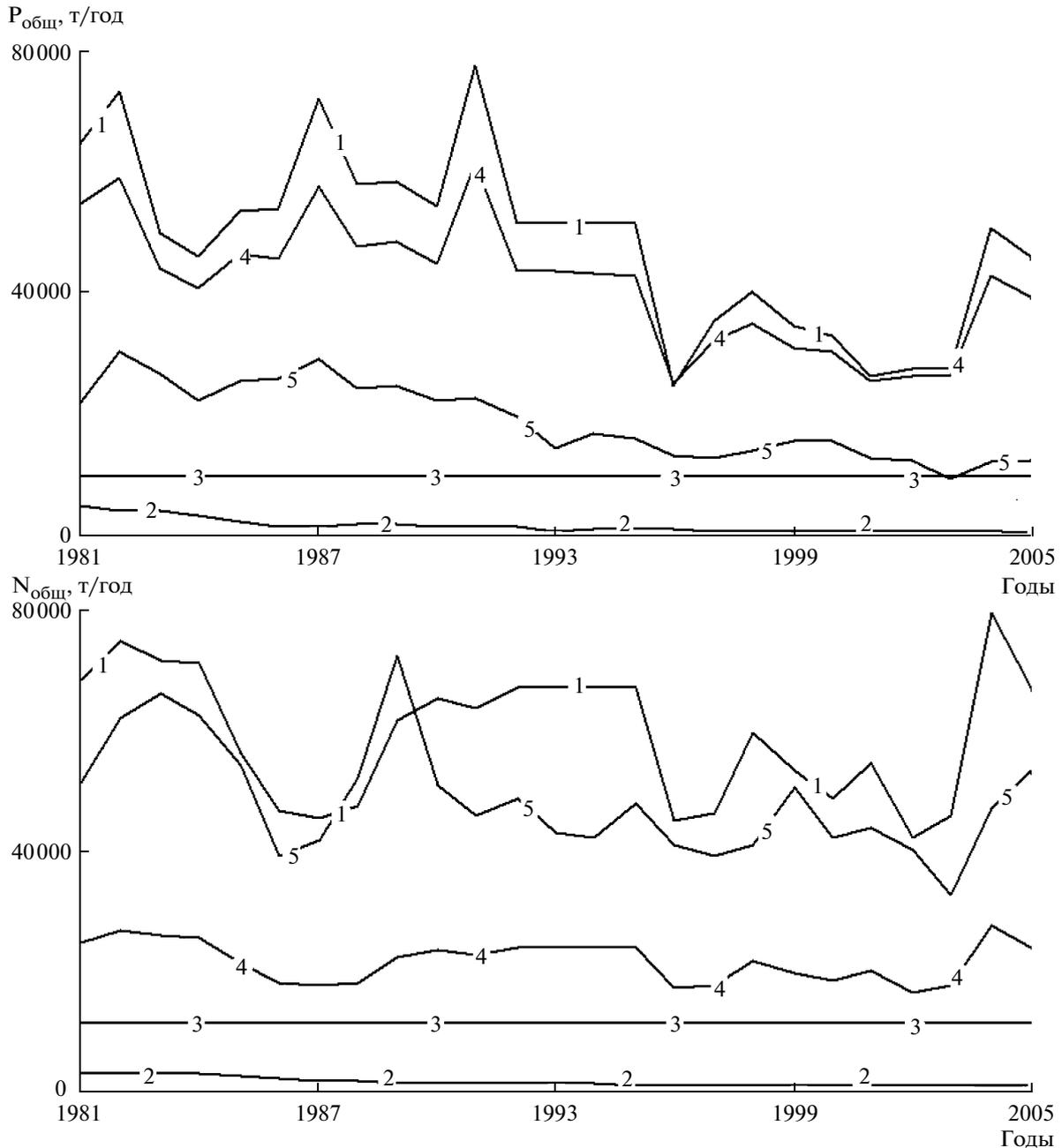


Рис. 2. Биогенный баланс Ладожского оз. по Р и по N. 1 – приток с водосбора, 2 – внутренняя нагрузка, 3 – атмосферные выпадения, 4 – удержание в озере, 5 – вынос со стоком р. Невы [9].

### ВЫНОС БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ЧУДСКО-ПСКОВСКОГО ОЗ. И НАРВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА СО СТОКОМ Р. НАРВЫ

Бассейн Чудско-Псковского оз., р. Нарвы и Нарвского водохранилища занимает ~56000 км<sup>2</sup> и расположен на территории четырех стран: 63.3% площади находится в Российской Федерации (северо-запад РФ: территории Псковской, Ленинградской и Новгородской областей), 30 в Эстонии, 5.9 в

Латвии и 0.6% в Республике Беларусь. Общая площадь Чудско-Псковского оз. составляет 3555 км<sup>2</sup>, Нарвского водохранилища – 191 км<sup>2</sup>. Объем водной массы Чудско-Псковского оз. – 25.07, Нарвского водохранилища – 0.37 км<sup>3</sup>.

Трофический статус основных частей Чудско-Псковского водоема (Псковского, Теплого и Чудского озер) различен. Псковское оз. считается гиперэвтрофным, Теплое оз. – переходящим к гиперэвтрофному, Чудское оз. – эвтрофным [10].

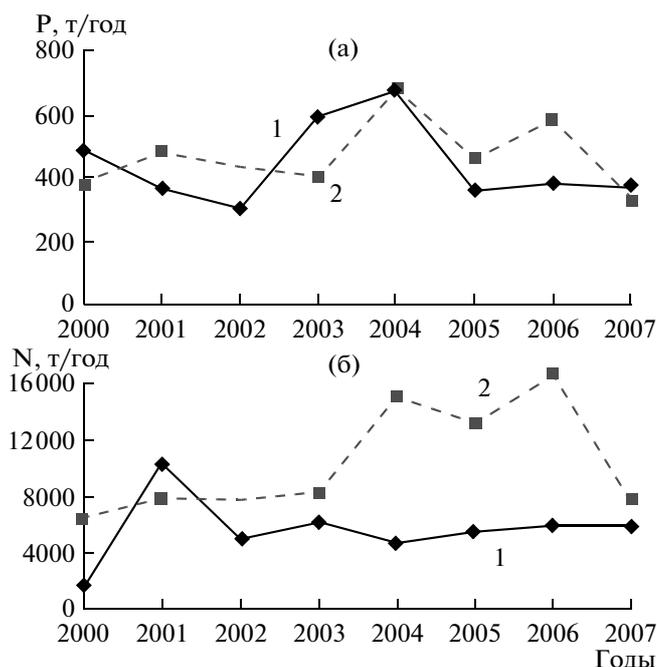


Рис. 3. Вынос  $P_{\text{общ}}$  и  $N_{\text{общ}}$  со стоком рек Великой (створ Псков) 1 и Нарвы (створ Ивангород) 2.

В настоящее время средние значения содержания биогенных веществ в Чудском оз., откуда вытекает р. Нарва, соединяющая озеро с Нарвским водохранилищем и Финским зал., составляют для  $P_{\text{общ}}$  40,  $N_{\text{общ}}$  660, для неорганических форм  $P$  7  $\text{мкг л}^{-1}$ . Внутригодовая изменчивость концентраций биогенных веществ в озерной воде характеризуется максимумом в осенне-зимний период ( $P_{\text{общ}}$  до 50  $\text{мкг л}^{-1}$ ,  $N_{\text{общ}}$  до 800  $\text{мкг л}^{-1}$ ) и минимумом в летний период ( $P_{\text{общ}}$  до 20  $\text{мкг л}^{-1}$ ,  $N_{\text{общ}}$  до 550  $\text{мкг л}^{-1}$ ). Значение весового соотношения  $N : P$  составляет 36, что подтверждает эвтрофный статус Чудского оз., водные массы которого формируют биогенную нагрузку на Финский зал.

Естественно, что на вынос биогенных веществ со стоком р. Нарвы, формирующий биогенную нагрузку на Финский зал., существенное влияние оказывают как поступление веществ с водосбора, так и внутриводоемные процессы. На рис. 3 приведено сравнение значений выноса  $P_{\text{общ}}$  и  $N_{\text{общ}}$  со стоком рек Великой (створ Псков) и Нарвы (створ Ивангород). Если вынос биогенов р. Великой характеризует нагрузку на Псковское оз. с Российской и Латвийской частей водосбора площадью 22400  $\text{км}^2$ , то вынос биогенов в створе Ивангород практически составляет нагрузку на Финский зал. от всей трансграничной водной системы, включая Нарвское водохранилище.

Из рис. 3 видно, что за 2000–2007 гг. вынос  $P_{\text{общ}}$  в створе Псков практически совпадал с выносом в створе Ивангород (коэффициент пересчета – 1.06 от среднего за период выноса в створе Псков). Вы-

нос  $N_{\text{общ}}$  р. Нарвой несколько выше, чем р. Великой (коэффициент пересчета – 1.82 от среднего за период выноса  $N_{\text{общ}}$  в створе Псков). Принимая во внимание соотношение площадей водосборов, соответствующих рассматриваемым створам, можно приблизительно оценить суммарное удержание биогенных веществ водной системой Чудско-Псковского оз. и Нарвского водохранилища – 56% нагрузки по  $P$ , 24% – по  $N$ .

Средние за 2000–2007 гг. значения выноса биогенных веществ на выходе из Нарвского водохранилища (створ Ивангород) составляют 469 т  $P_{\text{общ}}$   $\text{год}^{-1}$  и 10379 т  $N_{\text{общ}}$   $\text{год}^{-1}$ . Исходя из того, что Российская территория занимает только 63.3% общей площади водосбора, можно приблизительно оценить биогенную нагрузку на Финский зал. со стороны водной системы Чудско-Псковского оз., р. Нарвы и Нарвского водохранилища в 297 т  $P_{\text{общ}}$   $\text{год}^{-1}$  и 6570 т  $N_{\text{общ}}$   $\text{год}^{-1}$ . Приведенная количественная оценка справедлива, если принимается, что вынос биогенных веществ со стоком р. Великой репрезентативен для всего рассматриваемого водосбора.

## СБРОСЫ СТОЧНЫХ ВОД САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Санкт-Петербург – крупнейший мегаполис северо-запада России с пятимиллионным населением и многочисленными промышленными предприятиями. Город расположен на островах дельты и берегах р. Невы при ее впадении в Невскую губу Финского зал. Санкт-Петербург – основной точечный источник загрязнения как Невской губы, так и самого Финского зал. Качество воды и экологическое состояние Невской губы и восточной части Финского зал. в значительной степени зависят от сбросов очищенных и неочищенных сточных вод Санкт-Петербурга. Наиболее крупные очистные сооружения, находящиеся в ведении ГУП “Водоканал Санкт-Петербурга” и осуществляющие очистку сточных вод Санкт-Петербурга и сброс очищенных стоков на акватории Невской губы, – Центральная и Северная станции аэрации сточных вод, производительность которых составляет ~1400000 и 600000  $\text{м}^3$  сточных вод в сут. Система водоочистки постоянно совершенствуется. Так, в 2005 г. была закрыта на реконструкцию Красносельская станция аэрации (КСА) и введены в эксплуатацию Юго-западные очистные сооружения (ЮЗОС), максимальная пропускная способность которых достигла в 2006 г. 330000  $\text{м}^3$  сточных вод в сут. В настоящее время ~85% всех сточных вод Петербурга очищаются.

Динамика поступления  $P_{\text{общ}}$  и  $N_{\text{общ}}$  в Невскую губу Финского зал. со сточными водами Санкт-Петербурга представлена на рис. 4, из которого следует, что в 2007–2008 гг. биогенная нагрузка на Невскую губу со стороны Санкт-Петербурга составляла ~1200 т  $P_{\text{общ}}$   $\text{год}^{-1}$  и 11000 т  $N_{\text{общ}}$   $\text{год}^{-1}$  [2].

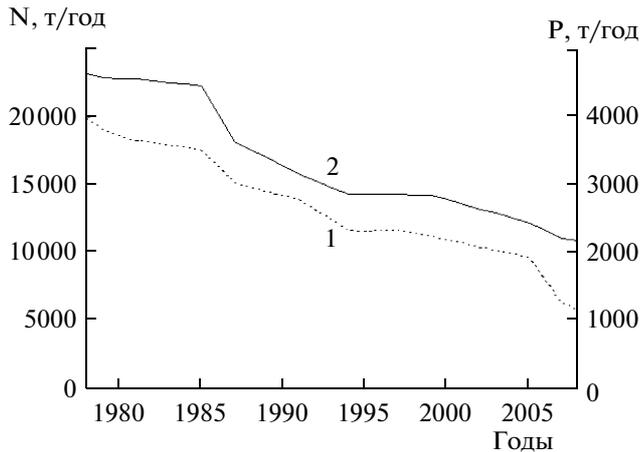


Рис. 4. Динамика поступления  $P_{\text{общ}}$  (1) и  $N_{\text{общ}}$  (2) в Невскую губу со сточными водами Санкт-Петербурга.

#### ВЫНОС БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ С ЧАСТНОГО ВОДОСБОРА ФИНСКОГО ЗАЛИВ

Особого внимания в настоящем исследовании заслуживает та часть водосбора, которая формирует нагрузку непосредственно на залив, или частный водосбор Финского зал. (водосбор 3 на рис. 1). Если вынос биогенных веществ из Ладожского оз. и биогенная нагрузка на Невскую губу со стороны Санкт-Петербурга могут быть количественно оценены по данным государственного мониторинга, государственной статистической отчетности или материалам ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», то для расчета выноса биогенных веществ с частного водосбора залива требуется применение методов математического моделирования. Причина — отсутствие регулярных наблюдений за стоком и качеством воды на малых притоках Российской части водосбора Финского зал.

Для расчетов биогенной нагрузки, сформированной на частном водосборе Финского зал., использована математическая модель, разработанная в Институте озераведения РАН и прошедшая верификацию на водосборах северо-запада России [3, 4]. Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование нагрузки на водосбор. К точечным источникам относятся муниципальные очистные сооружения, промышленные и сельскохозяйственные предприятия. К рассредоточенным — эмиссия биогенных веществ из почв, атмосферные выпадения, внесение минеральных и органических удобрений. В модели рассчитываются вынос биогенных веществ за пределы водосбора с выращенным урожаем, удержание химических веществ водосбором и его гидрографической сетью, а также вынос под воздействием стока. Конечный итог моделирования — количественная оценка внешней нагрузки на водоем или водоток со сторо-

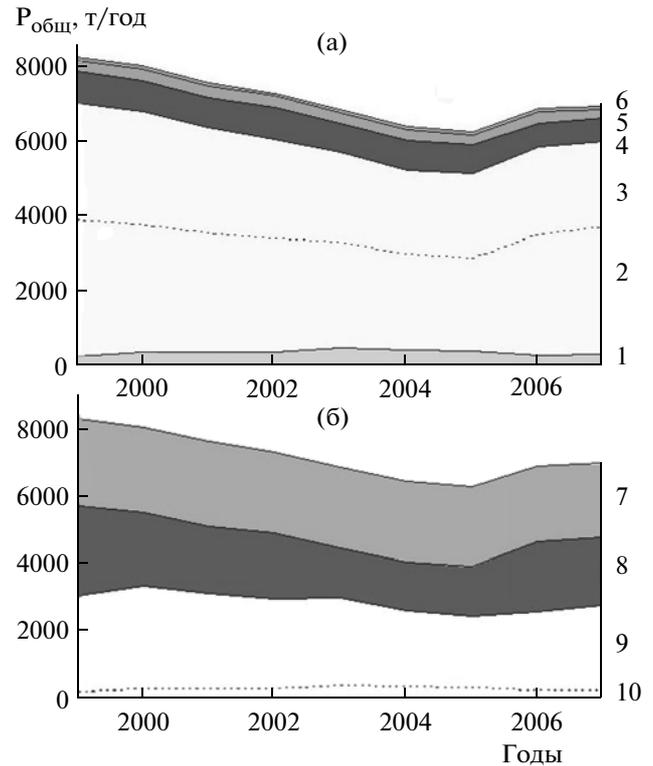
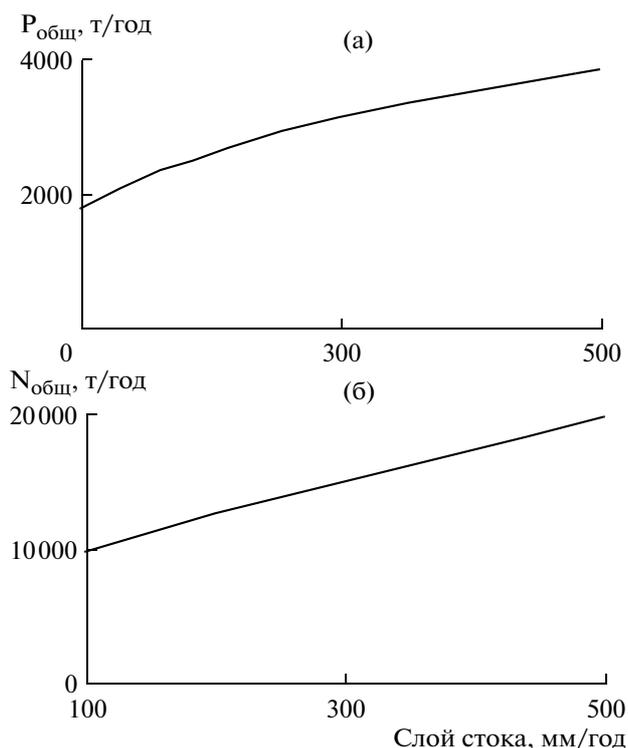


Рис. 5. Формирование нагрузки по Р на частный водосбор Финского зал. (а) и вынос  $P_{\text{общ}}$  с водосбора в залив (б): эмиссия из почв — 1, нагрузка от птицеводства — 2, нагрузка от животноводства — 3, минеральные удобрения — 4, точечные источники (без Санкт-Петербурга) — 5, атмосферные выпадения — 6, вынос с урожаем — 7, удержание гидрографической сетью водосбора — 8, антропогенная составляющая нагрузки на залив — 9, природная (фоновая) составляющая нагрузки на залив — 10.

ны водосбора, а также отдельных ее составляющих. Модель работает с годовым шагом по времени и ориентирована на использование в качестве входных данных результатов мониторинга водных объектов в северо-западном регионе России, а также материалов существующих форм государственной статистической отчетности.

Результаты расчетов основных составляющих нагрузки по Р на частный водосбор Финского зал. за 1999—2007 гг. приведены на рис. 5а. Расчеты выполнены в предположении, что все органическое вещество, образовавшееся на фермах и птицефабриках, участвует в формировании биогенной нагрузки на водосбор в форме органических удобрений. Из приведенных графиков видно, что наибольший вклад в формирование нагрузки на водосбор как по Р, так и по N вносят именно животноводческие фермы и птицефабрики. Суммарный вклад минеральных и органических удобрений в нагрузку на водосбор составляет ~90% по Р и ~80% по N в сравнении с нагрузкой на водосбор. Межгодовые различия в значениях нагрузки на водосбор



**Рис. 6.** Изменение биогенной нагрузки на Финский зал. в зависимости от слоя стока с его частного водосбора.

объясняются как изменчивостью основных ее компонентов, так и различной ежегодной водностью в рассмотренный период.

Однако, что следует из структуры модели, не все биогенные вещества, попавшие на поверхность водосбора, достигают Финского зал. Вынос  $P_{общ}$  и  $N_{общ}$  с водосбора с выращенным урожаем и удержание биогенов гидрографической сетью водосбора — причина того, что нагрузка на Финский зал. снижается до ~60% как по P, так и по N в сравнении с нагрузкой на водосбор. При этом природная

Основные компоненты биогенной нагрузки, т год<sup>-1</sup>, на Финский зал. с частного водосбора, рассчитанные для среднего многолетнего стока, равного 300 мм год<sup>-1</sup>

Составляющие биогенного баланса	$P_{общ}$	$N_{общ}$
Всего на водосбор	7110	35800
Вынос с урожаем	2222	15325
Удержание водосбором и гидрографической сетью	1761	5410
Нагрузка на Финский зал., в том числе	3127	15065
вклад точечных источников	136	974
вклад антропогенных рассредоточенных источников	2691	10122
природная составляющая	300	3969

(фоновая) составляющая нагрузки составляет ~10% по P и 25% по N в суммарной нагрузке на Финский зал. Динамика указанных потоков биогенных веществ отражена на рис. 5б. В соответствии с результатами расчетов нагрузка на Финский зал. с Российской части его частного водосбора в 2007 г. составляла 2736 т  $P_{общ}$  год<sup>-1</sup> и 13150 т  $N_{общ}$  год<sup>-1</sup>.

Вынос биогенных веществ с водосбора и нагрузка на Финский зал. в значительной степени зависят от водности года и стока с водосбора. С целью количественной оценки упомянутой зависимости выполнена серия имитационных расчетов формирования нагрузки при различных значениях слоя стока с водосбора (рис. 6). Анализ полученных результатов показывает, что увеличение стока приводит к увеличению эмиссии биогенных веществ из почв и к уменьшению удержания биогенных элементов гидрографической сетью водосбора. В результате биогенная нагрузка на Финский зал. возрастает. Изменчивость слоя стока в интервале значений от 200 до 400 мм год<sup>-1</sup> приводит к изменчивости биогенной нагрузки до ±20–25% относительно значений, соответствующих норме стока (300 мм год<sup>-1</sup>).

Количественная оценка биогенной нагрузки на Финский зал., приведенная выше, выполнена для условий 2007 г., характеризующегося низкой водностью (223 мм год<sup>-1</sup>). Если в расчетах принять значение слоя стока, равное норме, то значения нагрузки на залив с его частного водосбора составят 3127 т  $P_{общ}$  год<sup>-1</sup> и 15065 т  $N_{общ}$  год<sup>-1</sup> (таблица), что несколько выше оценки для 2007 г. Значения основных параметров модели, определяющих формирование биогенной нагрузки, принимались соответствующими условиям 2007 г.

Приведенные цифры — верхняя (максимальная) оценка биогенной нагрузки на залив с частного водосбора, так как в расчетах использовано предположение, что все биогенные вещества, образовавшиеся на животноводческих фермах и птицефабриках, участвуют в формировании нагрузки. Реальная ситуация отличается от гипотетической, однако не известно, насколько существенно. После сбора более подробной и достоверной информации о потоках биогенных веществ в пределах изучаемого водосбора количественная оценка нагрузки должна быть уточнена.

Суммируя значения нагрузки на Финский залив от четырех основных источников (вынос из Ладожского оз., Чудско-Псковского оз. и Нарвского водохранилища, с частного водосбора залива и сбросы Санкт-Петербурга), можно получить следующую количественную оценку существующей биогенной нагрузки: 5233 т  $P_{общ}$  год<sup>-1</sup> и 70820 т  $N_{общ}$  год<sup>-1</sup> для условий 2007 г. Сравнивая полученные цифры с рекомендациями ПДБМ для допустимой нагрузки на весь Финский зал. (4860 т  $P_{общ}$  год<sup>-1</sup> и 106680 т  $N_{общ}$  год<sup>-1</sup>), нетрудно видеть превышение расчетной нагрузки по P. Из сказанного следует, что

именно нагрузка по Р на залив с Российской территории и меры по ее возможному снижению должны быть исследованы в будущем с целью поиска путей минимизации антропогенной нагрузки.

Детальная и научно-обоснованная оценка предполагаемого снижения биогенной нагрузки на Финский зал. со стороны России будет сделана после представления необходимых данных Финляндией и Эстонией, занимающих ~35% площади водосбора, или после того, как ХЕЛКОМ определит допустимые значения сброса биогенных веществ именно для России. Однако уже сейчас следует искать пути снижения нагрузки на залив с Российской территории.

В рамках настоящего исследования проведена серия имитационных расчетов с использованием модели с целью оценить изменение биогенной нагрузки на Финский зал. в зависимости от возможных изменений наиболее значимых факторов, определяющих ее формирование. В одном из расчетов предполагалась оптимизация использования минеральных и органических удобрений в сельском хозяйстве, их полное усвоение сельскохозяйственными культурами и последующее изъятие из биогенного круговорота с выращенным урожаем. Биогенная нагрузка на Финский зал. с его частного водосбора в этом случае снизится до 482 т  $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и 6277 т  $N_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ , т. е. на 84% по Р и 58% по N относительно результатов расчетов, приведенных в таблице. Суммарная оценка биогенной нагрузки на Финский зал. составит в этом случае 2979 т  $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и 63947 т  $N_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ . Едва ли в настоящее время такая идеальная ситуация возможна в сельском хозяйстве северо-запада России, Ленинградской обл. в частности. Тем не менее, полученный результат выявляет основное направление действий по реальному и существенному снижению рассредоточенной биогенной нагрузки на Финский зал. с его частного водосбора.

Достоверность сделанных оценок в значительной степени зависит от достоверности исходных данных об основных источниках биогенной нагрузки.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования получена количественная оценка биогенной нагрузки на Финский зал. Балтийского моря с Российской части водосбора, которая в 2007–2008 гг. составляла 5233 т  $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и 70820 т  $N_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ , что превышает рекомендации ПДБМ ХЕЛКОМ по Р. Приведенная оценка нагрузки – максимальная, так как сделана в предположении, что все образовавшиеся на животноводческих фермах и птицефабриках биогенные вещества участвуют в ее формировании. В будущем при наличии более подробной и достоверной информации о потоках биогенных веществ в пределах

изучаемого водосбора, эта оценка будет уточнена. Крупные водоемы, расположенные на водосборе Финского зал. (озера Ладожское, Онежское, Сайма, Чудско-Псковское, Ильмень), – геохимические барьеры на пути миграции биогенных веществ с верховий водосбора в Балтийское море. Так, удержание Р в них составляет от 53 до 76% поступления извне. Следовательно, эффективность воздействия на биогенную нагрузку любых мероприятий, связанных с изменением нагрузки в верховьях водосбора, будет мала. Добиться существенного снижения биогенной нагрузки на залив за счет мероприятий в верхних частях водосбора будет крайне сложно.

Только ~12% площади водосбора непосредственно участвуют в формировании нагрузки на Финский зал. Это частный водосбор залива площадью ~28000 км<sup>2</sup>. На основе имитационных расчетов показано, что оптимизация использования минеральных и органических удобрений в сельском хозяйстве на частном водосборе залива, их полное усвоение сельскохозяйственными культурами и последующее изъятие из биогенного круговорота с выращенным урожаем снизит биогенную нагрузку на Финский зал. до 2979 т  $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и 63947 т  $N_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ . Полученный результат выявляет важное направление возможного снижения биогенной нагрузки на Финский зал. с его водосбора.

Следующий этап исследований в направлении изучения воздействия биогенной нагрузки на качество воды и экологическое состояние Финского зал., выходящих за рамки работы по соответствию среднегодовых значений нагрузки рекомендациям ПДБМ ХЕЛКОМ, – объединение модели формирования нагрузки со стороны водосбора и модели экосистемы Финского зал. Такая модель в настоящее время успешно разрабатывается в Санкт-Петербургском филиале Института океанологии РАН и Российском государственном гидрометеорологическом университете. В этом случае от модели водосбора потребуются не только среднегодовые значения нагрузки, но и сезонная динамика поступления общих и растворенных (биодоступных) форм биогенных веществ. Основное препятствие на пути успешного решения этой задачи – годовое осреднение информации в материалах государственной статистической отчетности по основным источникам биогенной нагрузки (сбросы очистных сооружений, поголовье скота и птицы, площади сельскохозяйственных угодий и др.). Чтобы преодолеть упомянутые сложности, достаточно самостоятельно собрать необходимую информацию по нескольким сотням наиболее крупных муниципальных, промышленных и сельскохозяйственных предприятий, что представляет собой трудоемкую и дорогостоящую задачу ближайшего будущего.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас “Ладожское озеро”. СПб.: ИНОЗ РАН, 2002. 128 с.
2. Водоканал Санкт-Петербурга – 2008. СПб., 2008. 52 с.
3. *Кондратьев С.А.* Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007, 255 с.
4. *Кондратьев С.А., Басова С.Л., Еришова А. и др.* Метод оценки биогенной нагрузки на водные объекты северо-запада России // Изв. Русского географического общества. 2009. Т. 141. № 2. С. 42–52.
5. Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее / Под. ред. Румянцева В.А., Драбковой В.Г. СПб.: Наука, 2002. 327 с.
6. Eutrophication in the Baltic Sea // Baltic Sea Environment Proceedings No 115B. Helsinki: Helsinki Commission Publ., 2009. 148 p.
7. HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki: Helsinki Commission Publ., 2007. 103 p.
8. *Kondratyev S.A.* The influence of catchment land covers on phosphorus balance for large freshwater system // Use of landscape sciences for the assessment of environmental security / Ed. Petrosillo I.N.Y.; London: Springer, 2008. P. 225–235.
9. *Kondratyev S., Ignatieva N.* An assessment of the nutrient load on the Russian part of the catchment of the Gulf of Finland and nutrient budget for Lake Ladoga // Finnish Environment. 2007. № 15. P. 22–25.
10. *Lake Peipsi.* Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry / Ed. Nõges T. Tartu: Sulemees Publ., 2001. 163 p.
11. *Sawyer C. N.* Fertilization of lakes by agricultural and urban drainage // New England Water Works Assoc. 1947. V. 61. № 2. P. 109–127.