

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*

ЕРШОВА АЛЕКСАНДРА АЛЕКСАНДРОВНА

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОСТУПЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ  
ВЕЩЕСТВ С ВОДОСБОРА РЕКИ НЕВА В ВОСТОЧНУЮ ЧАСТЬ  
ФИНСКОГО ЗАЛИВА**

Специальность 25.00.36 - Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук



Санкт-Петербург  
2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ).

*Научный руководитель:* доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Кондратьев Сергей Алексеевич  
Институт озераведения РАН

*Официальные оппоненты:* доктор географических наук, профессор  
Дмитриев Василий Васильевич  
Санкт-Петербургский государственный университет

кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник  
Гронская Татьяна Павловна  
Государственный гидрологический институт

*Ведущая организация:* Институт географии РАН

Защита состоится «28» ноября 2013 года в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.197.03 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, пр. Металлистов, д.3, ауд. 102.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат диссертации разослан «26» октября 2013 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Попова Е.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования.

В начале XX столетия Балтийское море было чистым, олиготрофным, то есть малопродуктивным, однако, в настоящее время значительные части моря являются эвтрофированными. Эвтрофикация, по определению Хельсинкской комиссии ХЕЛКОМ представляет собой процесс, при котором высокая концентрация питательных веществ (азота и фосфора) стимулирует рост водорослей, приводящий к несбалансированному функционированию экосистемы и в конечном итоге к ее полной деградации. В этой связи в целях снижения степени эвтрофирования Балтийского моря главная роль отводится мероприятиям по уменьшению поступления в морскую среду соединений азота и фосфора, чрезмерное поступление которых приводит к столь нежелательным последствиям для водной среды.

Водосбор реки Нева занимает значительную часть российской территории водосбора Восточной части Финского залива, который является одной из наиболее эвтрофированных акваторий Балтийского моря. На долю Российской Федерации в 1997 – 2003 гг. приходилось более трех четвертей фосфора и свыше двух третей азота, поступающих с водосбора в Финский залив. В ноябре 2007 г. на сессии Хельсинкской комиссии ХЕЛКОМ был принят План действий по Балтийскому морю (ПДБМ), который представляет собой долговременную стратегию оздоровления Балтийского моря. Одним из важнейших направлений ПДБМ является разработка мероприятий по снижению поступления в морскую экосистему общего фосфора ( $P_{\text{общ}}$ ) и общего азота ( $N_{\text{общ}}$ ), способствующих нежелательному эвтрофированию Балтики. ПДБМ предполагает в будущем установление платы за избыточное поступление биогенных веществ в море от каждой страны. Для Финского залива Балтийского моря определены максимальные возможные биогенные нагрузки в размере  $4860 \text{ т } P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и  $106680 \text{ т } N_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  (HELCOM, 2007).

Реализация мероприятий по уменьшению биогенной нагрузки города Санкт-Петербург проходит успешно, в настоящее время около 95 % сточных вод проходят очистку (Охрана окружающей среды..., 2012). В тоже время существуют значительные пробелы в информации о других потенциальных источниках биогенных веществ, поступающих в Восточную часть Финского залива с водосбора р.Нева. Несмотря на то, что были сделаны попытки оценить поступление биогенных элементов с Невой и ее притоками в Невскую губу (Торопова, 2006), а также исследовать различные составляющие биогенного баланса водосбора (Лыскова, 2007, Фрумин и др., 2011), научно-обоснованная количественная оценка природной и антропогенной составляющих биогенной

нагрузки на залив с водосбора р.Нева отсутствует. Некоторые работы (Торопова, 2006) содержат достаточно противоречивые выводы об отсутствии влияния всего хозяйственно-освоенного региона Санкт-Петербурга и Ленинградской области на содержание биогенных веществ в р.Нева.

Исследование процессов антропогенного эвтрофирования и снижения качества воды предполагает использование экологических моделей для оценки состояния и прогноза развития водной экосистемы. До сих пор не разработаны модели, адекватно описывающие формирование биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с водосбора р.Нева, и позволяющие прогнозировать возможные изменения биогенной нагрузки на залив в зависимости от различных мероприятий, проводимых на водосборе.

### **Цель и задачи работы.**

**Цель** настоящего исследования – количественная оценка внешней нагрузки общим фосфором и общим азотом на Восточную часть Финского залива Балтийского моря с водосбора р.Нева на основе данных мониторинга и математического моделирования, а также выявление вклада различных источников загрязнения в биогенную нагрузку.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**:

1. Выполнено усовершенствование модели выноса биогенных веществ с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водоем (разработаны новые блоки и усовершенствовано модельное описание отдельных процессов).
2. Выполнена количественная оценка биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива от следующих основных источников: вынос из Ладожского оз., сбросы сточных вод Санкт-Петербурга и вынос с частного водосбора р.Нева.
3. Выполнена оценка вклада различных источников естественного и антропогенного происхождения в формирование биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с частного водосбора р.Нева.
4. Выполнена оценка возможного изменения биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива в результате развития водохозяйственного комплекса на частном водосборе р.Нева.

### **Предмет и объект исследования.**

Объектом настоящего исследования являются особенности формирования внешней биогенной нагрузки на водосборе р.Нева от точечных и рассредоточенных источников. Предметом исследования является водосбор р.Нева.

### **Научная новизна исследования.**

1. Впервые предложена модель выноса биогенных веществ с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водоемы северо-запада России, ориентированная на информацию Государственного мониторинга водных объектов и Государственной статистической отчетности, с учетом физико-географических особенностей региона.

2. Впервые предложена методика оценки и прогноза биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с частного водосбора р.Нева на основе расчетов по разработанной автором модели с учетом вклада различных источников естественного и антропогенного происхождения.

3. Впервые на основе модельных расчетов выполнена научно-обоснованная оценка изменения биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива при различных сценариях изменения точечной и рассредоточенной нагрузки на частный водосбор р.Нева.

### **Защищаемые научные положения:**

1. Усовершенствованная модель выноса биогенных веществ с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водоем.

2. Методика и результаты комплексной научно-обоснованной количественной оценки биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с частного водосбора р.Нева на основе данных мониторинга и математического моделирования с учетом вклада различных источников естественного и антропогенного происхождения.

3. Научно-обоснованная количественная оценка возможных изменений биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива в будущем при различных сценариях изменения точечной и рассредоточенной нагрузки на частный водосбор р.Нева, полученная на основе модельных расчетов.

### **Личный вклад автора:**

Автором была проведена детальная инвентаризация источников точечной и рассредоточенной биогенной нагрузки на частном водосборе р.Нева.

Автором усовершенствована модель выноса примесей с водосбора и формирования нагрузки на водоем, разработанная в Институте озераведения РАН (Кондратьев, 2007):

- разработан новый блок расчета выноса общего азота,
- введен расчет удержания биогенных элементов водосбором,
- добавлен блок расчета выноса биогенных веществ с урожаем,
- усовершенствованы модельные описания отдельных процессов на водосборе.

С помощью полученной модели автором были выполнены научно-обоснованные оценочные расчеты биогенных нагрузок с водосбора р.Нева в настоящее время и в перспективе.

### **Практическая значимость полученных результатов.**

Полученные результаты позволяют оценить биогенную нагрузку на Восточную часть Финского залива с водосбора р.Нева и судить о последствиях проведения хозяйственных мероприятий на водосборе по различным сценариям. Разработаны рекомендации по снижению рассредоточенной биогенной нагрузки на Финский залив за счет оптимизации сельскохозяйственного производства. Такая оценка может служить основой для разработки приоритетной, экономичной и осуществимой программы мероприятий по улучшению качества воды в реке Нева и Финском заливе путем сокращения биогенного загрязнения из водосборного бассейна, исключая Санкт-Петербург.

Метод оценки, разработанный в рамках настоящего исследования, был использован в проекте «Разработка математической модели формирования качества воды реки Нева для принятия превентивных мер защиты водозабора», выполненном по заказу ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» в 2009 г.

По результатам выполнения проекта EU BaltHazAR II компонент 2.2 «Создание потенциала в рамках экологического мониторинга для получения данных загрязнения из различных источников, например, для HELCOM PLCs» (2012), финансируемого ХЕЛКОМ, сделан вывод о том, что разработанная модель биогенной нагрузки может быть использована для приближенной оценки биогенной нагрузки на Балтийское море с неизученных и малоизученных водосборов России.

### **Соответствие диссертации паспорту специальности.**

Исследование формирования биогенной нагрузки на водоем является частной задачей геоэкологии, решаемой с целью обеспечения оптимального и рационального использования водных ресурсов в условиях современного антропогенного воздействия. Можно констатировать, что результаты работы соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 25.00.36 Геоэкология, область исследований - Науки о Земле:

- 1.8. Природная среда и геоиндикаторы ее изменения под влиянием урбанизации и хозяйственной деятельности человека: химическое и радиоактивное загрязнение почв, пород, поверхностных и подземных вод и сокращение их ресурсов, наведенные физические поля, изменение криолитозоны;

- 1.14. Моделирование геоэкологических процессов.

### **Апробация работы.**

Результаты исследований по теме диссертации были представлены на 7 семинарах и научных конференциях, в том числе международных: на Третьей Всероссийской научной школе молодых ученых в Петрозаводске «Математические методы в экологии» (2008 г.), на летней школе «Полевые методы и эколого-гидрологические модели для интегрированного управления водными ресурсами в сельской местности», г.Киль, Германия («Field methods and eco-hydrological models for integrated water management in rural areas», Kiel, Germany) в 2008 г., на X и XII Международном экологическом форуме «День Балтийского моря» в 2009 и 2011 гг., на заседаниях по Трехстороннему Российско-Финско-Эстонскому сотрудничеству по Финскому заливу (2009, 2010 гг.), на 4ой междисциплинарной международной конференции по гидрологии и экологии HydroEco2013 в 2013 г.

Работа выполнена при частичной поддержке Правительства Санкт-Петербурга в рамках предоставления «Субсидий в виде грантов для студентов, аспирантов, молодых ученых, молодых кандидатов наук вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга в 2008 году», а также при частичной поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации мероприятия 1.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № 14.740.11.0827 от 30 ноября 2010 г.).

Результаты работы были использованы для разработки новых учебных материалов для студентов по курсам «Экология» и «Антропогенные воздействия на природные экосистемы» на Кафедре промышленной океанологии и охраны природных вод Российского государственного гидрометеорологического университета.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 2 статьи в изданиях из списка ВАК Министерства образования и науки РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и списка литературы. Общий объем работы - 120 страниц, содержит 25 рисунков, 20 таблиц и список использованной литературы из 205 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дается обоснование актуальности темы исследования, излагаются цели и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

### **Глава 1. Современное состояние математического моделирования процессов, обуславливающих формирование внешней нагрузки на водные объекты**

Глава посвящена анализу современного состояния математического моделирования процессов, обуславливающих формирование внешней нагрузки на водные объекты.

Математическая модель – формализованное представление существующих знаний о закономерностях и особенностях развития изучаемых природных систем и отдельных процессов в виде математических выражений. Построение любой математической модели связано с упрощенной формализацией условий протекания реальных природных процессов за счет выделения основополагающих аспектов и пренебрежения второстепенными факторами. Такая модель, с одной стороны, должна быть достаточно простой для понимания, с другой – адекватно, насколько возможно, описывать исследуемую природную систему.

Анализ полученных на сегодняшний день результатов, связанных с моделированием стока и выноса веществ с поверхности водосборов, формирования внешней нагрузки на водоемы и их отклика на внешние воздействия позволяет сделать следующие выводы (Румянцев и др., 1985; Кондратьев, 1992; Kondratyev, Mendel, 1996, 1997; Kondratyev, 1998, 2000).

1. Значительные успехи достигнуты в изучении и моделировании отдельных гидрологических и гидрохимических процессов, происходящих на водосборе. В то же время можно привести лишь несколько примеров удачного объединения моделей водосборов с моделями водоемов, при этом вопросы взаимного влияния компонентов (синергизма и антагонизма) не рассматриваются.
2. Большинство применяемых на практике моделей представляют собой различные комбинации хорошо апробированных частных моделей, описывающих отдельные процессы на водосборе.
3. Разнообразие решаемых задач, различия в строении водосборов, недостаток исходной информации и отсутствие полного представления об основных закономерностях изучаемых процессов не позволяют разработать какие-либо единые, пригодные на все случаи жизни модели. Чем большей



универсальностью или комплексностью характеризуется модель, тем меньше ее возможностей используется при решении каждой конкретной задачи.

4. Редко удается использовать созданную ранее модель для решения новой задачи на конкретном объекте. Авторы проектов обычно предпочитают разрабатывать собственный вариант модели, имеющий по возможности минимальную сложность и наиболее полно учитывающий требования поставленной задачи и особенности структуры водосбора.

Приступая к созданию математической модели стока, выноса вещества с водосбора и формирования внешней нагрузки на водоем, необходимо помнить о том, что она должна являться средством решения актуальных природоохранных проблем, доступным широкому кругу специалистов. Основными факторами, определяющими структуру каждой конкретной модели, являются: требования задачи, характеристики объекта исследований и изучаемых процессов, а также наличие и состав исходной информации. Исходя из перечисленных факторов, выбираются соответствующие пространственно-временные характеристики модели (масштабы по времени и пространству), определяется шаг расчетов по времени, и производится схематизация поверхности водосбора.

Для успешного решения разнообразных задач, связанных с моделированием процессов на водосборе и формирования внешней нагрузки на водные объекты, специалист должен иметь в своем распоряжении систему частных моделей, которые описывают сток, водную эрозию и вынос химических веществ с различной степенью детализации. Модели могут работать как в комплексе, так и самостоятельно. В целях формализации процедуры построения комплексной модели водосбора или системы водосбор-водоем в главе сформулированы общие требования к выбору частных моделей и их компоновке в рамках результирующей модели. Перечисленные требования позволяют специалисту проводить выбор и рационально компоновать работоспособные модели, соответствующие поставленным требованиям и реалистично описывающие происходящие природные процессы.

## **Глава 2. Анализ условий формирования биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с водосбора р.Нева**

В Главе 2 представлено описание физико-географических особенностей водосбора р.Нева, проведен анализ условий формирования биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с водосбора р.Нева; представлены результаты оценки биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива для источников, обеспеченных данными измерений, достаточными для проведения необходимых расчетов.

### **Физико-географические особенности водосбора р.Нева.**

Река Нева — это протока между Ладожским озером и Финским заливом длиной 74 км. Она берет начало в Шлиссельбургской губе Ладожского озера и впадает в Невскую губу Финского залива, образуя из множества рукавов, проток, каналов обширную дельту, на которой расположен город Санкт-Петербург. Бассейн Невы - огромная территория, занимающая более 280000 квадратных километров на северо-западе России и юго-востоке Финляндии. Однако, только 1.8 % площади всего водосбора р.Нева непосредственно участвует в формировании нагрузки на Финский залив. Это собственный (частный) водосбор р.Нева (от истока из Ладоги до устья) площадью ~5500 км<sup>2</sup> (рис. 1). Остальная часть территории бассейна р.Нева является водосбором Ладожского озера, включающего водосборы озер Онежского и Ильмень. Химический состав невской воды вне пределов Санкт-Петербурга определяется как химическим составом воды Ладожского озера, так и хозяйственной деятельностью на собственном водосборе р.Нева. Непосредственно в Неву впадает 26 небольших рек и речек, крупнейшие из которых: Мга, Тосна, Ижора, Славянка, впадающие с левого берега и Черная и Охта, впадающие с правого. Разные виды землепользования на собственном водосборе Невы распределены очень неравномерно. Большинство урбанизированных территорий расположено на территории Санкт-Петербурга и его городов-спутников. Также большинство сельскохозяйственных предприятий находится недалеко от города в силу более развитой инфраструктуры. Другой характерной особенностью водосбора является то, что большинство ферм и сельскохозяйственных угодий располагается недалеко от водных объектов, чаще всего на берегах рек водосбора. Большая часть водосбора (72%) представлена лесами (хвойными, лиственными и смешанными) и болотами.

В настоящей работе рассматриваются следующие источники биогенной нагрузки на Финский залив с водосбора р.Нева:

1. вынос биогенных веществ из Ладожского озера со стоком р.Нева,
2. вынос биогенных веществ с частного водосбора р.Нева.

Для сравнения объемов биогенных веществ, поступающих в Восточную часть Финского залива с водами р.Нева, в работе также приводится оценка нагрузки на залив от города Санкт-Петербург.

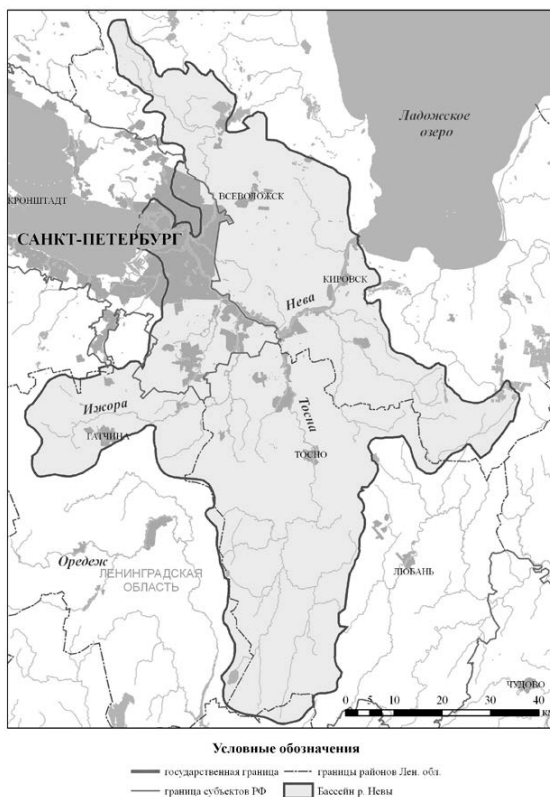


Рисунок 1 - Собственный (частный) водосбор р.Нева.

Если вынос биогенных веществ из Ладожского озера, а также 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 собственного водосбора Невы требуется применение методов математического моделирования. Главной причиной является отсутствие регулярных наблюдений за стоком и качеством воды на притоках р.Нева, а также отсутствие достоверных данных о концентрациях веществ в самой Неве. До сих пор наблюдательная сеть Росгидромета постоянно сокращается, а качество измерений неуклонно падает. Однако при оценке работоспособности моделей и качества выполненных расчетов

достоверность измеренных характеристик, с которыми сравниваются результаты моделирования, принимается за абсолютную истину.

По различным оценкам вынос биогенных веществ со стоком реки Невы из Ладожского озера (рассчитанный как концентрация вещества, мг/л умноженная на годовую расход реки) в разные годы либо практически не отличается от выноса биогенов Невой в Невскую губу, либо даже превосходит его (Фрумин и др., 2011, Торопова, 2006, Лыскова, 2007). Данные мониторинга в самой Неве также показывают, что измеренные концентрации веществ от истока до устья меняются незначительно. При этом, по оценкам ГУП «Водоканал» в целом воды притоков существенно грязнее, чем воды в р. Нева. Недостаточная репрезентативность и достоверность данных о концентрациях веществ в самой Неве может быть объяснена особенностями переноса примеси в русле реки: примесь, поступившая в русло Невы, распространяется вдоль левого берега в струйном режиме с минимальным влиянием на загрязнение водных масс в центральной части потока (Румянцев и др., 2011).

Таким образом, данные измерений концентраций в р.Нева не отражают реальную нагрузку биогенными элементами с водосбора на реку. Определение внешней нагрузки и ее составляющих в этом случае не может проводиться путем фиксации поступления веществ из различных источников в водоем, т.е. на основе данных натуральных наблюдений (мониторинга). Следовательно, *необходим инструмент, позволяющий получить оценку внешней биогенной нагрузки на р.Нева, не основанный на данных измерения концентраций веществ в воде.*

Таким инструментом может служить расчет поступления загрязняющих веществ на водосбор от различных источников, их выноса с водосбора под воздействием талых и дождевых вод и формирования нагрузки на водоем. Данный подход также обеспечивает возможность проведения имитационных и прогностических расчетов с целью оценки изменений внешней нагрузки на водоем в зависимости от изменений хозяйственной деятельности на водосборном бассейне и возможных изменений климата.

Результаты математического моделирования формирования биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с частного водосбора р.Нева изложены в последующих главах.

### **Вынос биогенных веществ из Ладожского озера со стоком р.Нева.**

Ладожское озеро площадью 17 870 км<sup>2</sup> с объемом водной массы 838 км<sup>3</sup>, средней и максимальной глубинами 47 и 230 м соответственно является крупнейшим озером Европы и десятым в мире по запасу пресной воды. Водосборный бассейн озера площадью около 280 000 км<sup>2</sup> расположен на территории трех государств: России (80% общей площади), Финляндии (19.9%) и

Белоруссии (0.1%). В конце 70-х - начале 80-х годов внешняя нагрузка  $P_{\text{общ}}$ , определяющая уровень эвтрофирования водоема, составляла  $0.38-0.45 \text{ г м}^{-2}\text{год}^{-1}$ , что соответствовало критическому для Ладожского озера значению, при котором возможен переход озера в эвтрофное состояние. В дальнейшем поступление фосфора снижалось, в 80-х годах, главным образом, благодаря совершенствованию промышленных технологий и эффективности природоохранных мероприятий, а с начала 90-х годов в связи с экономическими причинами и снижением уровня сельскохозяйственного и промышленного производства. В последние годы нагрузка  $P_{\text{общ}}$  на Ладожское озеро достигла значений  $0.16-0.23 \text{ г м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ , что соответствует уровню нагрузки, свойственной мезотрофным водоемам. Внешняя нагрузка  $N_{\text{общ}}$  на Ладожское озеро за период с 1976 по 2003 гг. находилась в пределах от 2.9 до  $4.3 \text{ г м}^{-2}\text{год}^{-1}$ . Средняя за год концентрация общего азота в воде притоков составляла  $650-850 \text{ мкг л}^{-1}$ . В отличие от фосфора, тренд в сторону снижения выноса азота в озеро в 90-е годы практически не прослеживается.

Результаты расчета основных компонент биогенного баланса Ладожского озера, выполненные для периода 1980-2002 гг. (Kondratyev, Ignatieva, 2007), показывают, что наиболее значимыми компонентами баланса являются, в приходной части, поступление  $N_{\text{общ}}$  и  $P_{\text{общ}}$  со стоком рек, в расходной – удержание в озере и вынос со стоком р.Нева, представляющий первостепенный интерес для настоящего исследования. Согласно приведенным данным, вынос  $P_{\text{общ}}$  из Ладожского озера сначала увеличился с  $2140 \text{ т год}^{-1}$  в 1980 г. до  $2940 \text{ т год}^{-1}$  в 1982 г., а затем снизился до  $1180 \text{ т год}^{-1}$  в 2002 г. Вынос  $N_{\text{общ}}$  за рассмотренный период уменьшился незначительно и составлял  $40000-50000 \text{ т год}^{-1}$  в зависимости от водности года. По оценкам специалистов Института озераведения РАН, в последние годы вынос биогенных веществ из Ладожского озера со стоком р. Невы не меняется и составляет около  $1000 \text{ т } P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и  $40100 \text{ т } N_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  (Сорокин и др., 2008; Голубев и др., 2009).

Крупные водоемы, расположенные на водосборе Ладожского озера, являются геохимическим барьером на пути миграции биогенных веществ с верховий водосбора в Балтийское море. Как показано в работах (Кондратьев, 2007; Kondratyev, 2008), озера Сайма, Онега и Ильмень удерживают соответственно 71, 76 и 53% фосфорной нагрузки со стороны водосбора. Удержание фосфора в самом Ладожском озере составляет около 70% поступившего извне  $P_{\text{общ}}$ , удержание  $N_{\text{общ}}$  - около 30%. Следовательно, эффективность воздействия мероприятий, связанных с изменением нагрузки в верховьях водосбора, на биогенную нагрузку на Финский залив будет невысокой.

## Сбросы сточных вод Санкт-Петербурга

Санкт-Петербург – крупнейший мегаполис северо-запада России с пятимиллионным населением и многочисленными промышленными предприятиями расположен на островах дельты и берегах р.Нева при ее впадении в Невскую губу Финского залива. Санкт-Петербург является основным точечным источником загрязнения как Невской губы, так и самого Финского залива. Качество воды и экологическое состояние Невской губы и восточной части Финского залива в значительной степени зависят от сбросов очищенных и неочищенных сточных вод Санкт-Петербурга.

14 очистных сооружений, находящиеся в ведении ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», осуществляют очистку сточных вод Санкт-Петербурга и сброс очищенных стоков на акватории Невской губы. Наиболее крупными из них являются Центральная и Северная станции аэрации и Юго-Западные очистные сооружения, производительность которых составляет соответственно около 1 500 000, 1 250 000 и 330 000 м<sup>3</sup> сточных вод в сутки (в 2011 г.). За последние годы сделаны существенные шаги в развитии технологий очистки сточных вод, улучшении экологической ситуации города и акватории Финского залива. В 2010 и 2011 гг. выполнен ряд мероприятий по развитию системы канализования, очистки сточных вод и обработки (сжигания) осадка (Охрана окружающей среды..., 2011). С принятием 15 ноября 2007 года новой Рекомендации по очистке городских сточных вод произошло значительное ужесточение требований к очистке сточных вод.

В настоящее время 94% всех сточных вод Петербурга очищаются, а к 2015 году планируется очищать до 98% всех сточных вод города. В июне 2011 года С.-Петербург полностью выполнил новые рекомендации Хельсинкской комиссии: содержание фосфора в общем сбросе городских сточных вод не превышает 0,5 мг/дм<sup>3</sup>. Динамика поступления  $P_{\text{общ}}$  и  $N_{\text{общ}}$  в Невскую губу Финского залива со сточными водами Санкт-Петербурга представлена в отчетах ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», из которых следует, что в последние годы нагрузка биогенными элементами на Невскую губу от данного вида источника значительно снизилась и в 2011 году составила около 492 т  $P_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup> и 10049 т  $N_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>. В 2009 году нагрузка биогенными элементами на Невскую губу составила **760** т  $P_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup> и **10730** т  $N_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>.

Таким образом, суммарная биогенная нагрузка на Финский залив с водосбора р.Нева, которая может быть оценена на основе данных мониторинга и официальной статистической отчетности (вынос из Ладожского озера и сбросы Санкт-Петербурга), для условий 2009 г. составляет **1760** т  $P_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup> и **50830** т  $N_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>.

### **Глава 3. Математическая модель формирования биогенной нагрузки на крупные водоемы северо-запада России, ориентированная на использование данных системы Государственного мониторинга водных объектов и Государственной статистической отчетности.**

В главе представлены результаты разработки модели формирования биогенной нагрузки на крупные водоемы северо-запада России, ориентированной на использование данных системы Государственного мониторинга водных объектов и Государственной статистической отчетности. В настоящей работе предложенная модель является средством оценки биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с частного водосбора р.Нева.

За основу модели принят базовый вариант модели стока, выноса примесей с водосбора и формирования нагрузки на водоем, разработанный в Институте озераедения РАН (Кондратьев, 2007). Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование нагрузки на водосбор. Точечными источниками нагрузки являются сбросы муниципальных, промышленных и сельскохозяйственных предприятий. Рассредоточенными источниками - эмиссия из почв, атмосферные выпадения, внесение минеральных и органических удобрений на поля. Модель рассчитывает удержание биогенных веществ гидрографической сетью водосбора и водоемами и вынос примесей с водосбора под воздействием гидрологических факторов. Конечным итогом моделирования является количественная оценка внешней нагрузки на водоем или водоток и отдельных ее составляющих со стороны водосбора.

Для решения задач, стоящих перед настоящим исследованием в структуру базовой модели внесены следующие усовершенствования и дополнения:

- Добавлен блок расчета выноса с водосбора общего азота, поступившего от точечных и рассредоточенных источников;
- Для расчета удержания биогенных веществ водосбором в зависимости от слоя стока и суммарной площади водных объектов в модели использована методика, разработанная в Институте пресноводной экологии и рыбоводства Германии (Behrendt, Opitz, 2000).
- Добавлен блок расчета выноса биогенных веществ за пределы водосбора с выращенным урожаем. Параметрами расчета являются состав выращиваемых культур и их собранная масса, а также содержание биогенных веществ в этих культурах (Методические..., 1988; Рекомендации..., 1989);
- При расчетах рассредоточенной азотной нагрузки на водосбор использованы предположения (1) о равенстве значений поступления азота из атмосферы (выпадения с осадками + фиксация биотой) и его удаления в

результате денитрификации, и (2) о том, что все органическое вещество, образовавшееся на фермах и птицефабриках, используется в качестве удобрений на полях.

Основными составляющими суммарной биогенной нагрузки на водосбор ( $L_{tot}$ ) являются нагрузка, сформированная точечными источниками ( $L_p$ ), рассредоточенная эмиссия химических веществ различными типами подстилающей поверхности ( $L_e$ ), нагрузка за счет внесения минеральных удобрений ( $L_{mf}$ ), нагрузка, сформированная органическими удобрениями ( $L_{of}$ ), вынос химических веществ с урожаем ( $L_c$ ) и массообмен с атмосферой ( $L_a$ ):

$$L_{tot} = L_p + L_e + L_{mf} + L_{of} - L_c \pm L_a. \quad (1)$$

Все члены уравнения (1) имеют размерность [М/Т], где М – размерность массы, Т – размерность времени.

Так как модель ориентирована на использование материалов мониторинга водных объектов и форм государственной статистической отчетности, представляющих среднегодовую информацию о сбросах сточных вод, внесении удобрений, поголовье скота и т.д., то в качестве расчетного интервала в модели принят 1 год. Общая структура предложенной модели приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 - Схема модели выноса химических веществ с водосбора и формирования внешней нагрузки на водоемы



### Расчет основных составляющих модели:

1) *точечные источники* ( $L_p$ ): показаны различные методики расчета данного компонента, однако, в настоящее время основным официальным источником информации о сбросах сточных вод являются статистические формы 2ТПВодхоз Министерства природных ресурсов и экологии.

2) *рассредоточенная нагрузка* на водосбор, сформированная в результате эмиссии химических веществ с различных типов подстилающей поверхности (естественных и антропогенных) в стекающие дождевые и талые воды ( $L_e$ ):

$$L_e = \sum_i k_{ei} A_i, \quad (2)$$

где  $k_{ei}$  - коэффициент эмиссии вещества с  $i$ -го типа подстилающей поверхности [ $ML^{-2}T^{-1}$ ],  $A_i$  - площадь  $i$ -го типа подстилающей поверхности [LT],  $L$  - размерность расстояния.

3) для расчета поступления биогенных веществ на водосбор с *минеральными удобрениями* ( $L_{mf}$ ) для условий Ленинградской области целесообразно использовать информацию, предоставляемую Государственными статистическими организациями.

4) поступление биогенных веществ на водосбор с *органическими удобрениями* ( $L_{of}$ ): рассчитывается в предположении, что весь образовавшийся на фермах и птицефабриках навоз и помет остается в пределах рассматриваемого водосбора:

$$L_{of} = \sum_j k_{fj} N_j, \quad (3)$$

где  $k_{fj}$  - коэффициент эмиссии  $P_{общ}$  или  $N_{общ}$  одного домашнего животного  $j$ -го наименования [ $MT^{-1}$ ],  $N_j$  - количество домашних животных (или птицы).

5) для количественной оценки выноса химических веществ за пределы водосбора с *собранным урожаем* ( $L_c$ ) используется следующая расчетная зависимость (Методические..., 1988; Рекомендации..., 1989):

$$L_c = \sum_s K_s U_s A_s, \quad (4)$$

где  $K_s$  - вынос химического вещества с растительной массой урожая  $s$ -вида сельскохозяйственной культуры [ $MM^{-1}$ ],  $U_s$  - урожайность  $s$ -вида сельскохозяйственной культуры [ $ML^{-2}T^{-1}$ ],  $A_s$  - площадь, занятая  $s$ -видом сельскохозяйственной культуры [ $L^2$ ].

б) в соответствии с предложенным методом для расчета удержания биогенных веществ водосбором (Behrendt, Opitz, 2000) нагрузка на водный объект  $L$ , принимающий сток воды и примесей, рассчитывается следующим образом:

$$L = R_t L_{tot} = (1 - R_r) L_{tot}, \quad (5)$$

где  $R_t$  и  $R_r$  – коэффициенты выноса и удержания вещества [безразм.], соответственно. Авторами модели предложены эмпирические соотношения, связывающие значения коэффициентов для общего фосфора, общего и минерального азота со значениями модуля стока  $q$  [ $L^3 L^{-2} T^{-1}$ ] и гидравлической нагрузкой на водные объекты водосбора  $HL$  [ $L T^{-1}$ ].

Проверка работоспособности предложенной модели выноса биогенных веществ проведена на водосборах рек, расположенных на территории изучаемого водосбора. Это крупнейшие притоки р.Нева - Тосна (площадь водосбора - 1639 км<sup>2</sup>) и Ижора (1005 км<sup>2</sup>). На рисунке 3 приведен пример расчета выноса  $P_{общ}$  и  $N_{общ}$  со стоком реки Ижора за период 1999 – 2007 гг.

Можно констатировать, что результаты моделирования не всегда хорошо отражают межгодовую изменчивость выноса биогенных веществ, полученную по данным измерений расходов воды и концентраций примеси в замыкающих створах рек. Однако, как следует из официальных источников информации (формы 2ТПВодхоз, Сельхозстатистика) за рассмотренный интервал времени поступление биогенных веществ как от точечных, так и от рассредоточенных источников на водосборах притоков было достаточно равномерным. *Расчеты по модели отражают именно эту тенденцию*, причины резких изменений выноса биогенов со стоком рассмотренных рек в существующей официальной исходной информации не отражены. В тоже время, было показано, что средние рассчитанные и измеренные значения выноса статистически равны. Удовлетворительное соответствие результатов моделирования и натурных данных явилось обоснованием последующего использования модели для оценки биогенной нагрузки на р.Нева с ее частного водосбора.

Ограниченность отечественной системы сбора данных по основным составляющим нагрузки и факторам, их определяющих, не позволила использовать в модели более детальные методы расчета характеристик стока и выноса примесей с учетом их внутригодовой динамики и неоднородностей по площади водосбора.

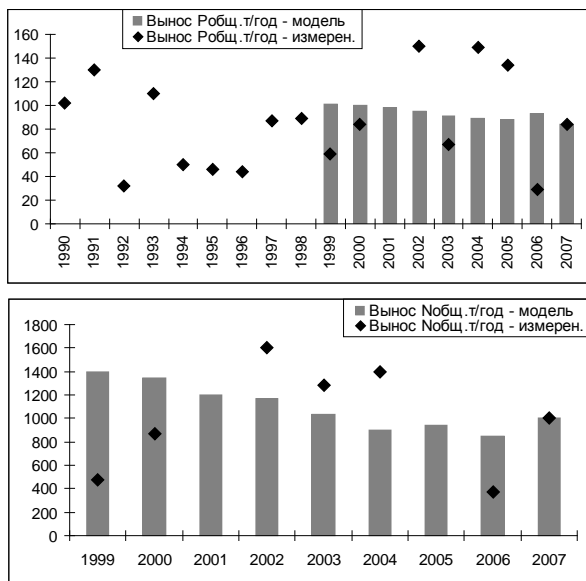


Рисунок 3 - Измеренные и рассчитанные значения выноса общего фосфора и общего азота (т год<sup>-1</sup>) с водосбора р. Ижоры

#### Глава 4. Результаты расчетов биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с частного водосбора р.Нева

Результаты расчетов основных составляющих биогенной нагрузки на частный водосбор р.Нева за период 2000 – 2009 гг. приведены на рисунке 4. Расчеты выполнены в предположении о том, что все органическое вещество, образовавшееся на фермах птицефабриках, участвует в формировании биогенной нагрузки на водосбор в качестве органических удобрений.

Из приведенных графиков видно, что наибольший вклад в формирование нагрузки на водосбор, как по азоту, так и по фосфору, вносят животноводческие фермы и птицефабрики. Однако, как это следует из структуры модели, не все биогенные вещества, попавшие на поверхность водосбора, достигают Невы, т.к. частично выносятся с выращенным урожаем, удерживаются водосбором и его гидрографической сетью. Оставшаяся часть биогенных веществ формирует внешнюю нагрузку на реку. Динамика указанных потоков биогенных веществ представлена на рисунке 5. Очевидна значимость такого фактора формирования биогенной нагрузки, как вынос азота и фосфора за пределы водосбора с выращенным урожаем.

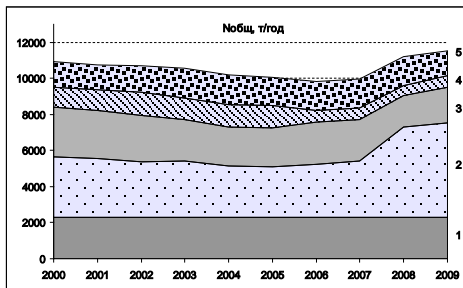
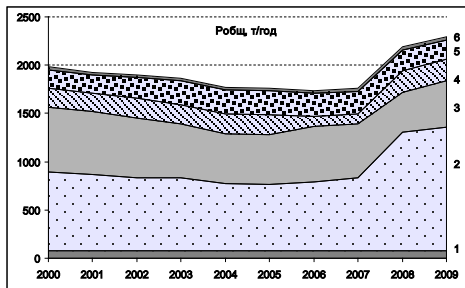


Рисунок 4 - Формирование фосфорной и азотной нагрузки на частный водосбор р.Нева: эмиссия из почв (1), птицеводство (2), животноводство (3), минеральные удобрения (4), точечные источники (5), атмосферные выпадения (6).

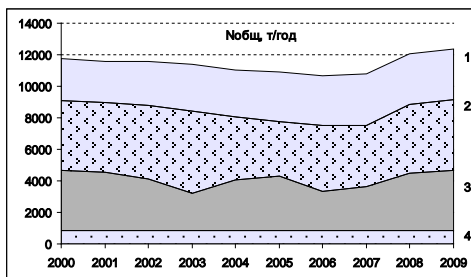
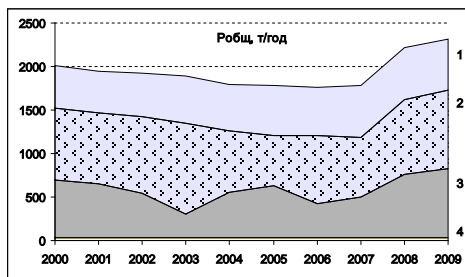


Рисунок 5 - Формирование фосфорной и азотной нагрузки на р.Нева с её частного водосбора: вынос с урожаем (1), удержание гидрографической сетью водосбора (2), антропогенная нагрузка на залив (3), природная (фоновая) нагрузка на залив (4).

Выполненные расчеты показали, что биогенная нагрузка на р.Нева с её частного водосбора в 2009 г. составляла примерно  $790 \text{ т } P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и  $3830 \text{ т } N_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ . Доминирующую роль имеют антропогенные рассредоточенные источники биогенной нагрузки: 87 % для  $P_{\text{общ}}$  и 81 % для  $N_{\text{общ}}$  от значения суммарной нагрузки на реку.

Вынос  $P_{\text{общ}}$  и  $N_{\text{общ}}$  за пределы водосбора с выращенным урожаем и удержание биогенов гидрографической сетью являются причиной того, что нагрузка на саму р.Нева снижается на 65 % для фосфора и на 67 % для азота по сравнению с нагрузкой на водосбор. При этом естественная (фоновая) компонента нагрузки составляет 3 % для фосфора и 16 % для азота от значений суммарной нагрузки на реку.

Таблица 1 - Основные компоненты биогенной нагрузки (т год<sup>-1</sup>) на р.Нева с ее частного водосбора для условий 2009 г.

Вещество	$P_{общ}$	$N_{общ}$
Вынос с урбанизированных территорий (рассредоточенное население)	37	523
Эмиссия из почв	36	1786
Массообмен с атмосферой	11	-
Сбросы точечных источников	200	1408
Органические удобрения (продукты животноводства)	482	2014
Органические удобрения (продукты птицеводства)	1283	5206
Минеральные удобрения	224	600
<b>Всего на водосбор</b>	<b>2280</b>	<b>11538</b>
Вынос с урожаем	591	3229
Удержание водосбором и гидрографической сетью	898	4476
<b>Нагрузка на р.Неву</b>	<b>791</b>	<b>3832</b>
В том числе естественная составляющая	27	624

В данном расчете биогенная нагрузка органическими удобрениями – это максимальное потенциально возможное значение нагрузки при условии полного использования всего навоза и помета, образовавшегося в пределах водосбора, в качестве удобрений для сельскохозяйственных угодий. Возможно, полученный результат является завышенным по отношению к действительности. Однако, при отсутствии достоверной информации о биогенных потоках в пределах водосбора, такое предположение представляется наиболее приемлемым для настоящей задачи.

Вынос биогенных веществ с водосбора и нагрузка на р.Нева 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. Показано, что увеличение стока приводит к увеличению эмиссии биогенных веществ из почв и к уменьшению удержания биогенов гидрографической сетью водосбора. В результате биогенная нагрузка на реку возрастает. Изменчивость слоя стока в интервале значений от 200 до 450 мм год<sup>-1</sup> приводит к изменчивости биогенной нагрузки до  $\pm 20-25\%$  относительно значений, соответствующих норме стока (300 мм год<sup>-1</sup>).

Количественная оценка основных компонентов биогенной нагрузки на р.Нева с частного водосбора, приведенная выше, выполнена для условий 2009 г., характеризующегося пониженной водностью ( $y = 223$  мм год<sup>-1</sup>). Если в расчетах

нагрузки на р.Нева принять значение слоя стока равное норме ( $y = 300 \text{ мм год}^{-1}$ ), то нагрузка на реку составит  $870 \text{ т год}^{-1}$  по  $P_{\text{общ}}$  и  $4830 \text{ т год}^{-1}$  по  $N_{\text{общ}}$ . Доля природной составляющей нагрузки возрастает до 10 % для фосфора и 26% для азота от значений суммарной нагрузки на р.Нева. Это вполне естественно, так как вынос биогенных веществ с природных территорий увеличивается при увеличении слоя стока.

Таким образом, проделанные расчеты показали, что биогенная нагрузка на Неву с частного водосбора в 2009 г. составляла **790 т  $P_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>** и **3830 т  $N_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>**. Значения биогенной нагрузки, рассчитанные для среднего многолетнего стока несколько выше: **870 т  $P_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>** и **4830 т  $N_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>**. Приведенные цифры являются верхней (максимальной) оценкой биогенной нагрузки на реку с водосбора р.Нева.

Если просуммировать значения нагрузки от основных источников (вынос из Ладожского озера со стоком р.Нева, сбросы сточных вод Санкт-Петербурга, вынос биогенных веществ с частного водосбора р.Нева), то суммарная биогенная нагрузка на Восточную часть Финского залива с водосбора р.Нева для условий 2009 г. составила около **2550 т  $P_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>** и **54660 т  $N_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>** (табл. 2).

Таблица 2 – Основные компоненты нагрузки общим фосфором и общим азотом, т/год на Восточную часть Финского залива с водосбора р.Нева в 2009 году

Вещество	$P_{\text{общ}}, \text{ т год}^{-1}$	% от общей нагрузки	$N_{\text{общ}}, \text{ т год}^{-1}$	% от общей нагрузки
Вынос из Ладожского озера со стоком р. Нева	1000	40 %	40100	73 %
Сбросы сточных вод Санкт-Петербурга	760	29 %	10730	20 %
Вынос с частного водосбора р.Нева	790	31 %	3830	7 %
Нагрузка на Восточную часть Финского залива, <b>Всего:</b>	<b>2550</b>		<b>54660</b>	

## Глава 5. Возможные перспективы изменения биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с частного водосбора р.Нева

В имитационных расчетах, выполненных с целью оценки возможных будущих изменений биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с водосбора р.Нева, использовался как конкретный сценарий изменения нагрузки от

точечных источников на срок до 2026 г. (сценарий Ленводпроекта), так и гипотетические сценарии изменения землепользования в регионе.

### **Оценка последствий изменения нагрузки на частный водосбор р.Нева от точечных источников загрязнения.**

В рамках сценария Института Ленводпроект (Схема..., 2008) рассматривается изменение нагрузки, сформированной в бассейнах основных рек Ленинградской области, впадающих в Финский залив, в том числе для частного водосбора р.Нева в пределах Ленинградской области. В бассейне р.Нева возможно лишь незначительное уменьшение водоотведения – на 3 %, здесь увеличение сброса сточных вод от различных отраслей промышленности уравнивается уменьшением водоотведения в энергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве.

Количественная оценка изменения биогенной нагрузки на водные объекты частного водосбора р.Нева, сделанная в соответствии с инерционным сценарием развития экономической ситуации в регионе, позволяет предположить уменьшение биогенной нагрузки на водные объекты частного водосбора р.Нева к 2026 г. на 6 т  $P_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$  и 43 т  $N_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$ . С учетом удержания биогенная нагрузка на р.Неву с частного водосбора в целом к 2026 г. уменьшится на 3 т  $P_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$  и 25 т  $N_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$  и составит **788** т  $P_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$  и **3807** т  $N_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$  для года средней водности. Таким образом, можно сделать вывод о совсем незначительном уменьшении суммарной нагрузки на реку к 2026 г. в результате развития промышленности в северо-западном регионе России по инерционному сценарию.

### **Возможное снижение нагрузки на р.Нева за счет оптимизации использования минеральных и органических удобрений.**

Проведена серия имитационных расчетов, с учетом возможной оптимизации использования минеральных и органических удобрений в сельском хозяйстве Ленинградской области, т.е. их частичное (50%) или полное (100%) усвоение сельскохозяйственными культурами, выращиваемыми на удобряемых полях, и последующий вынос биогенных веществ за пределы водосбора с продукцией сельского хозяйства.

При частичном усвоении удобрений (50%) по сравнению с результатами предшествующих расчетов нагрузки на водосбор для условий 2009 года нагрузка на водосбор р.Нева может существенно снизиться и составить 1400 т  $P_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$  и 7930 т  $N_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$ . Соответственно, с учетом удержания водосбором и выноса с урожаем, биогенная нагрузка на реку станет существенно меньше – **250** т  $P_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$  и **1620** т  $N_{\text{общ}} \text{год}^{-1}$ .

Если предположить, что происходит полное усвоение органических удобрений сельскохозяйственными культурами, выращиваемыми на удобряемых

полях, и последующий вынос биогенных веществ за пределы водосбора с продукцией сельского хозяйства, то нагрузка на водосбор уменьшится еще на 150 т  $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и 720 т  $N_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и составит около **100** т  $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и **900** т  $N_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ .

Результаты расчетов для условий 2009 г. по приведенным двум сценариям представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Основные компоненты биогенной нагрузки (т  $\text{год}^{-1}$ ) на р.Нева с ее частного водосбора для условий 2009 г. в предположении 50 % или полного усвоения биогенных веществ, образовавшихся на фермах и птицефабриках

Вещество	$P_{\text{общ}}$		$N_{\text{общ}}$	
	50 %	100 %	50 %	100 %
	<i>орг.в-ва</i>	<i>орг.в-ва</i>	<i>орг.в-ва</i>	<i>орг.в-ва</i>
Всего на водосбор	1400	415	7930	3520
<b>Нагрузка на р.Неву</b>	<b>250</b>	<b>100</b>	<b>1620</b>	<b>900</b>

Таким образом, в результате оптимизации использования органических удобрений в сельском хозяйстве Ленинградской области при их полном усвоении сельскохозяйственными культурами, выращиваемыми на удобряемых полях, и при последующем выносе биогенных веществ за пределы водосбора с продукцией сельского хозяйства, биогенная нагрузка на Неву может снизиться на 86 % по общему фосфору и 76% по общему азоту относительно условий 2009 г.

Оценка итоговой биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива (т  $\text{год}^{-1}$ ) с водосбора р.Нева с учетом условий развития сельскохозяйственного комплекса, установившихся в 2009 году, в предположении, что все органическое вещество усваивается сельскохозяйственными культурами и впоследствии выносится с урожаем за пределы водосбора, а также с учетом планируемого ГУП «Водоканал» уменьшения поступления  $P_{\text{общ}}$  и  $N_{\text{общ}}$  в Невскую губу Финского залива со сточными водами Санкт-Петербурга показала, что к 2015 году нагрузка биогенными элементами на Невскую губу может составить примерно **1440** т  $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и **49400** т  $N_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ . С учетом того, что водосбор р.Нева является частью водосбора Восточной части Финского залива, то при достижении таких значений биогенной нагрузки фактически возможно выполнение рекомендаций ПДБМ ХЕЛКОМ (HELCOM..., 2008) в отношении допустимой нагрузки на Финский залив со всего его водосбора (4860 т  $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и 106680 т  $N_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ ).

Встает естественный вопрос о возможности усвоения такого количества навоза и помета, образующихся за год на животноводческих комплексах и птицефабриках, сельским хозяйством Ленинградской области. Для ответа на этот вопрос выполнена оценка и сравнение реальной биогенной нагрузки на сельскохозяйственные угодья Ленинградской области в результате реального



внесения минеральных и органических удобрений в 1987 г., возможной биогенной нагрузки, рассчитанной в предположении о том, что все биогенные вещества, содержащиеся в минеральных удобрениях, помете и навозе используются для получения урожая, и нагрузки, рекомендованные ХЕЛКОМ (HELCOM..., 2008).

Таблица 4 - Современные, прошлые и нормативные биогенные нагрузки на полевые участки Ленинградской области (кг га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>).

	P <sub>общ</sub>	N <sub>общ</sub>
Возможная современная нагрузка на полевые участки водосбора за счет внесения минеральных удобрений и полного использования всего образовавшегося органического вещества	35	151
Биогенная нагрузка с удобрениями (минеральными и органическими) на полевые участки Ленинградской области в 1987 г.	43	228
Биогенная нагрузка с удобрениями на полевые участки в соответствии с нормативами ХЕЛКОМ (HELCOM..., 2008).	25	170

Как видно из приведенной таблицы, гипотетическая ситуация с полным использованием всего органического вещества, образовавшегося на фермах и птицефабриках, вполне реальна. Азотная нагрузка находится в пределах нормативов ХЕЛКОМ. Фосфорная нагрузка превышает нормативное значение на 40 %. При этом оба гипотетических расчетных значения биогенной нагрузки (35 кг P<sub>общ</sub> га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> и 151 кг N<sub>общ</sub> га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>) существенно меньше доз реального внесения биогенных веществ в 1987 г. (43 кг P<sub>общ</sub> га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> и 228 кг N<sub>общ</sub> га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>). Из сказанного можно сделать вывод, что практически все биогенные вещества, образовавшиеся в птицеводстве и животноводстве, могут быть эффективно использованы в сельском хозяйстве Ленинградской области для получения более высоких урожаев, изыматься из биогенного круговорота на водосборе и не участвовать в формировании биогенной нагрузки на Финский залив.

Показано, что основное направление действий по реальному снижению рассредоточенной биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с водосбора р.Нева это – оптимизация сельскохозяйственного производства за счет максимального и эффективного использования органического вещества, образовавшегося на животноводческих фермах и птицефабриках, в качестве органических удобрений на полях.

## Заключение

1. Выполнено успешное усовершенствование модели выноса биогенных веществ с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водоем, разработаны и добавлены новые блоки и усовершенствовано модельное описание отдельных процессов.

2. Показано, что только 1.8 % площади водосбора р.Нева непосредственно участвуют в формировании биогенной нагрузки на реку. Это частный водосбор р.Нева (от истока из Ладоги до устья), включающий город Санкт-Петербург. Остальная часть территории бассейна р.Нева является водосбором Ладожского озера, которое удерживает около 70% общего фосфора и около 30% общего азота.

3. На основе математического моделирования выполнена количественная оценка биогенной нагрузки на р.Нева с ее частного водосбора в период 2000-2009 гг. Биогенная нагрузка на р.Нева в 2009 г. составляла примерно **790** т  $P_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup> и **3830** т  $N_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>. Доминирующую роль имеют антропогенные рассредоточенные источники биогенной нагрузки (более 80 %).

4. Показано, что вынос  $P_{\text{общ}}$  и  $N_{\text{общ}}$  за пределы водосбора с выращенным урожаем и удержание биогенов гидрографической сетью являются причиной значительного снижения нагрузки на саму р.Нева с частного водосбора (снижение на более чем 65 %).

5. Оценка вклада различных источников естественного и антропогенного происхождения в формирование биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива с частного водосбора р.Нева, показала, что естественная (фоновая) компонента нагрузки составляет 3 % для фосфора и 16 % для азота от значений суммарной нагрузки на реку.

6. Суммарное значение нагрузки от основных источников на Восточную часть Финского залива с водосбора р.Нева для условий 2009 г. (вынос из Ладожского озера со стоком р.Нева, сбросы сточных вод Санкт-Петербурга, вынос биогенных веществ с частного водосбора р.Нева) составило **2550** т  $P_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup> и **54660** т  $N_{\text{общ}}$  год<sup>-1</sup>. Показано, что частный водосбор р.Нева формирует 31 % по общему фосфору и 7 % по общему азоту от общей биогенной нагрузки на водосбор.

7. На основе результатов имитационного моделирования показано, что наиболее перспективным направлением снижения рассредоточенной биогенной нагрузки на Восточную часть Финского залива является оптимизация сельскохозяйственного производства за счет максимального и эффективного использования органического вещества, образовавшегося на животноводческих фермах и птицефабриках, в качестве органических удобрений на полях. При полном использовании всего органического вещества биогенная нагрузка на

Восточную часть Финского залива со всего водосбора р.Нева составит около **1440** т  $P_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$  и **49400** т  $N_{\text{общ}} \text{ год}^{-1}$ , что фактически является выполнением рекомендаций ХЕЛКОМ (HELCOM..., 2008) в отношении допустимой нагрузки на Финский залив.

#### **Список основных публикаций по теме диссертации:**

- 1.** Кондратьев С.А., Басова С.Л., **Ершова А.А.**, Ефремова Л.В., Маркова Е.Г., Шмакова М.В. Метод оценки биогенной нагрузки на водные объекты Северо-запада России. // Изв. РГО. – 2009. – Т. 141. Вып. 2. – С. 42 – 52. (*рецензируемый журнал из списка ВАК*)
- 2.** Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Рыбакин В.Н., Крючков А.М., Моисеенков А.И., Шмакова М.В., **Ершова А.А.** Экспериментальные исследования и моделирование формирования качества воды в реке Нева. // Изв. РГО. – 2010. – Т. 142. Вып. 2. – С. 24 – 31. (*рецензируемый журнал из списка ВАК*)
- 3.** **Ершова А.А.** Оценка биогенной нагрузки на водосбор р.Нева // Тезисы докладов Третьей Всероссийской школы молодых ученых «Математические методы в экологии», Петрозаводск, 24-29 августа, 2008 года. - Петрозаводск: изд-во КарНЦ РАН, 2008. С. 38-40.
- 4.** Eremina T., Khaimina O., Lange E., Maximov A., **Ershova A.** Impact of hydraulic engineering activity on the Neva estuary and Eastern part of the Gulf of Finland ecosystem. BSSC 2009 Abstract book, August 17-21, 2009, Tallinn, Estonia. Tallinn University of Technology, 2009. P.222.
- 5.** Еремина Т.Р., Рыбалко А.Е., Корнеев О.Ю., Хаймина О.В., Исаев А.В., Ланге Е.К., **Ершова А.А.**, Максимов А.А., Зайцев В.М., Марковец И.М., Чичкова Е.Ф. Оценка состояния восточной части Финского залива и Невской губы по данным комплексного мониторинга в 2008 году // Сборник тезисов X Международного экологического форума «День Балтийского моря» 17-19 марта 2009 года. – СПб.: ООО «Макси-Принт», 2009. - С. 49-50.
- 6.** **Ершова А.А.**, Кондратьев С.А. Оценка биогенной нагрузки на водосбор реки Нева // Сборник тезисов X Международного экологического форума «День Балтийского моря» 17-19 марта 2009 года. – СПб.: ООО «Макси-Принт», 2009. - С. 50-51.
- 7.** **Ershova A.A.**, Kondratyev S.A. Assessment of nutrient load on the Neva river sub-catchment // Proc. X International Environmental Form “The Baltic Sea Day” March 17-19, 2009. – St.Petersburg, Maksi-Print, 2009. – P. 318-319.
- 8.** Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Шмакова М.В., **Ершова А.А.**, Поздняков Ш.Р., Крючков А.М. Формирование качества воды в реке Нева // Сборник тезисов XI Международного экологического форума «День Балтийского моря» 22-24 марта 2010 года. – СПб.: ООО «Макси-Принт», 2010. - С. 182-183.

9. Rumyantsev V.A., Kondratyev S.A., Shmakova M.V., **Ershova A.A.**, Pozdnyakov Sh.R., Kryuchkov A.M. Formation of the Neva river water quality // Proc. XI International Environmental Form “The Baltic Sea Day” March 22-24, 2010. – St.Petersburg, Maksi-Print, 2010. – P. 437-438.

10. Еремина Т.Р., Ланге Е.К., **Ершова А.А.**, Исаев А.В., Хаймина О.В. Оценка состояния вод Финского залива по индикаторам ХЕЛКОМ на основе данных наблюдений // Сборник тезисов XII Международного экологического форума «День Балтийского моря» 21-23 марта 2011 года. – СПб.: ООО «Цветпринт», 2011. – С. 50-51.

11. Eremina T., Lange E., **Ershova A.**, Isaev A., Khaimina O. The Gulf of Finland water state assessment according to the HELCOM indicators based on observational data // Proc. XII International Environmental Form “The Baltic Sea Day” March 21-23, 2011. – St.Petersburg, Tsvetprint, 2011. – P. 308-309.

12. **Ershova A.**, Kondratyev S. A method of assessment of nutrient loading on water bodies of North-Western Russia // Proc. 4th interdisciplinary international conference on hydrology and ecology HydroEco2013: emerging patterns, breakthroughs and challenges, 13-16 May, 2013, Rennes, France. - P. 65.

#### **Другие публикации:**

1. Karlin L., M.Shilin, T.Eremina, **A.Ershova**, A.Suzyumov (2012) Studying sustainability through the research with the floating university project. In Leal Filho, W. (Ed) Sustainable Development at Universities: New Horizons. Peter Lang Scientific Publishers, Frankfurt am Main. 2012. 994 pp. (Карлин Л., Шилин М., Еремина Т., Ершова А., Сузюмов А. Изучение концепции устойчивого развития через исследования в рамках проекта Плавающий университет. В кн. Устойчивое развитие в университетах: новые горизонты. 2012. Под ред. В.Л. Фильхо. Изд. Петер Ланг, Франкфурт-на-Майне. 994 с.)