

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВА-
ТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Клубов Степан Максимович

**ВЛИЯНИЕ УРБАНИЗАЦИИ ВОДОСБОРНОГО БАССЕЙНА НА
ЭВТРОФИКАЦИЮ ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ НЕВСКОЙ ГУБЫ И
ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА**

Специальность 1.6.21 — Геоэкология (географические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете.

Научный руководитель: **Третьяков Виктор Юрьевич**
кандидат географических наук, доцент кафедры геоэкологии Института наук о Земле СПбГУ, доцент кафедры прикладной и системной экологии РГГМУ

Официальные оппоненты: **Кондратьев Сергей Алексеевич**
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Государственного научного центра РФ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» («ГосНИОРХ им. Л.С. Берга»), г. Санкт-Петербург

Беспалова Людмила Александровна
Доктор географических наук, доцент, профессор кафедры океанологии Института наук о Земле Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН), г. Москва

Защита диссертации состоится «29» мая 2026 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.365.01 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу 195196, г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» и на сайте совета: <https://www.rshu.ru/university/dissertations/>

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Я. А. Петров

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Все водные экосистемы Земли в той или иной степени подвержены антропогенному воздействию в виде загрязнения токсическими веществами и эвтрофирования. Биогенная нагрузка (азот и фосфор) на водные экосистемы поступает со сточными водами, атмосферными осадками и стоком с водосборных бассейнов.

Увеличение численности населения и урбанизация негативно воздействуют на водные экосистемы. Поступление биогенных веществ с урбанизированных территорий — определяющий фактор загрязнения и эвтрофикации экосистем водоемов на водосборном бассейне Балтийского моря и экосистемы самого моря.

Недавние оценки показывают, что вызванное поступлением азотных и фосфорных удобрений эвтрофирование продолжает оставаться одной из основных экологических проблем европейских морей (ЮНЕП, 2024). Эта проблема особенно остро стоит для таких замкнутых морских акваторий с незначительным водообменом с остальными частями Мирового океана, как Балтийское и Чёрное моря, а также для закрытого Каспийского моря.

Наибольшая ответственность за сохранение экологического благополучия морской среды Балтийского моря лежит на странах, на территории которых располагается большая часть его водосборного бассейна (Helcom, 2007). Общая площадь водосборного бассейна Балтики составляет 1740000 км², его наибольшие части расположены на территории Швеции – 440040 км² (26 %) и России 314800 км² (18%) (Helcom, 2007). Потому на нашей стране лежит повышенная ответственность за сохранение морской среды Балтийского моря.

Степень разработанности проблемы. Существует большое количество оценок модулей стока общего азота и фосфора и моделей расчёта модулей, выполненных как отечественными, так и зарубежными авторами. Предложены разные модели и подходы для определения модулей стока общего азота и фосфора с водосборных бассейнов. Например, наиболее известной моделью для определения биогенной нагрузки с российской части водосбора Финского залива является модель ILLM (Institute of Limnology Load Model). Она разработана в Институте озераедения РАН под руководством С.А. Кондратьева. Обширные исследования по оценке биогенной нагрузки на экосистемы Финского залива выполнены Г.К. и А.Г. Осиповыми (Осипов и др., 2020). Ими приводятся фоновые значения биогенной нагрузки с водосборов ряда водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива. Подобная оценка приведена в работах Е.В. Степановой. Уже многие годы официальная оценка биогенной нагрузки со стоком реки Невы и её рукавов приводится в публикациях под редакцией Г.Т. Фрумина (Герман, Серебрицкий, 2023). Под его руководством выпол-

нен ряд работ, посвященных оценке биогенной нагрузки со стоком водотоков Северо-Запада России (Stepanova, Frumin, 2014, Frumin, Gildeeva 2014). Свои оценки биогенной нагрузки с водосборов Северо-Запада России приводят А.А. Ершова (Ершова, 2013) и Б.В. Чубаренко (Чубаренко и др., 2017).

Среди иностранных исследований заслуживает внимания работа М. Brylinsky (Brylinskiy, 2004). В этой монографии приводятся сведения о характерных модулях стока с водосборов с различным ландшафтным строением в провинции Новая Шотландия (Канада). Необходимо отметить монографию «Urban Drainage» ряда авторов из Великобритании (Butler et al, 2011). В ней представлены характерные модули стока азота и фосфора с урбанизированных водосборов США и Великобритании с учётом их строения и количества выпадающих осадков. Отдельного внимания заслуживают работы японских и американских ученых, посвященные оценке выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных земель. Коллектив японских ученых под руководством Y.W. Feng (Feng et al, 2005) выполнил натурные исследования оценки выноса биогенных элементов с рисовых полей в Японии. В США под руководством C.D.D. Sohoulane проведены исследования выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в Северной Каролине (США) за период 2002-2020 гг. (Sohoulane et al, 2022).

Цель и задачи исследования. Цель исследования заключается в оценке объемов поступления в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах административной границы Санкт-Петербурга соединений азота и фосфора, не учитываемых при мониторинге химического состава речных вод и объемов стока.

Задачами исследования являются:

- 1) Выполнить по литературным источникам анализ особенностей влияния урбанизации на эвтрофирование внутренних водоёмов и морских акваторий.
- 2) Определить источники и пути поступления соединений азота и фосфора в водные экосистемы с урбанизированных территорий.
- 3) Проанализировать возможности снижения антропогенной нагрузки с помощью очистки хозяйственно-бытовых и промышленных стоков.
- 4) Выполнить обзор значений модулей стока соединений азота и фосфора с природных, сельскохозяйственных и урбанизированных территорий по литературным источникам.
- 5) Определить поступление соединений азота и фосфора с атмосферными осадками на акваторию Невской губы и восточную часть Финского залива в пределах административной границы Санкт-Петербурга.

- 6) Определить поступление соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах административной границы Санкт-Петербурга со стоками очистных сооружений.
- 7) Разработать методику определения модулей стока соединений азота и фосфора с водосборов Санкт-Петербурга и Ленинградской области.
- 8) Определить модули стока соединений азота и фосфора с водосборных бассейнов, на водотоках которых отсутствуют створы мониторинга расходов воды и химического состава стока.
- 9) Определить долю неучтенного поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах Санкт-Петербурга в их общем поступлении в эти акватории.
- 10) Подготовить данные для анализа влияния неучтенного поступления соединений азота и фосфора с частных водосборных бассейнов Невской губы на функционирование её экосистемы с помощью имитационного моделирования.

Объект исследований. Объектами исследования являются водосборные бассейны водотоков, впадающих в Финский залив и Невскую губу с территории Санкт-Петербурга, биогенный сток с которых не учитывается при оценке поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива.

Предмет исследования. Предметом исследования являются модули стока общего азота и фосфора с указанных водосборных бассейнов, а также внутригодовая динамика этих модулей.

Методология и методы исследования. При выполнении исследований автором применялись статистические методы обработки численной информации, геоинформационные методы обработки картографической информации, методика применения водосборов-аналогов, компьютерное моделирование функционирования экосистемы Невской губы. В качестве источника использованы данные мониторинга расходов воды и химического состава речного стока на створах Северо-Западного управления по гидрометеорологии и контролю окружающей среды (СЗУГМС) за 80-е годы XX века и 2010-е годы. Используются данные гидрохимического мониторинга качества поверхностных вод объектов-приемников сточных вод ГУП «Водоканал СПб». Приводятся и использованы результаты собственных исследований по определению расходов воды и химического состава вод водотоков, расположенных на юго-западе Санкт-Петербурга.

Положения, выносимые на защиту:

1) Модули стока соединений азота и фосфора с урбанизированных территорий во всем мире значительно превышают модули стока этих же субстанций с природных водосборных бассейнов.

2) С помощью разработанных методик оценено не учитываемое ранее поступление соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с их частных водосборов и с атмосферными выпадениями. Для Невской губы оно составляет приблизительно 2311 тонн общего азота и 135 тонн общего фосфора за год, а для восточной части Финского залива около 1252 и 112 тонн общего азота и фосфора.

3) Выполнено сравнение объемов поступления в Невскую губу соединений азота и фосфора из разных источников: стока реки Невы, стоков очистных сооружений, атмосферных осадков и стока с неучитываемых ранее частных водосборов Невской губы. Согласно нашей оценке доля стока реки Невы в поступлении общего азота и фосфора составляет соответственно 85 и 65 %, доля поступления со сточными водами очистных сооружений – 11 и 26 %, со стоком с частных водосборов – 3 и 5 %, с атмосферными осадками – около 1 и 2 %.

4) Около 97 % поступления общего азота и фосфора в восточную часть Финского залива приходится на приток из Невской губы. Среднегодовые концентрации общего азота и фосфора в Невской губе выше их концентраций в восточной части Финского залива.

5) Модули стока с неучитываемых водосборов Невской губы и восточной части Финского залива согласно нашим расчётам, составили соответственно 1,113 и 0,066 тонн/км² в год общего азота и фосфора. Эти значения в 4,7 и 6 раз превышают максимально допускаемые Хельсинской комиссией по защите морской среды Балтийского моря (Helcom). Такое превышение связано с урбанизацией и антропогенным преобразованием водосборов на территориях Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

6) Поступление общего азота и фосфора в Невскую губу со стоком реки Невы в 26 и 12 раз больше, чем с частных водосборов Невской губы. По этой причине сток с частных водосборов Невской губы не оказывает существенного воздействия на эвтрофирование её экосистемы.

7) По существующей оценке СЗУГМС, недоучет поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах Санкт-Петербурга составляет около 7 % для общего азота и 20 % для общего фосфора. Это дополнительное поступление с неучитываемых при мониторинге водосборов и с атмосферными осадками.

Научная новизна исследования. Для оценки поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива в

пределах административной границы Санкт-Петербурга с частных водосборов этих акваторий были разработаны следующие методики:

1) Модификации цифровой модели рельефа ASTER для её использования в городских условиях: были убраны искажения высот ячеек цифровой модели рельефа (ЦМР) из-за зданий и сооружений, локальные понижения и увеличена контрастность ЦМР в местах расположения русел водотоков. Данная методика позволяет увеличить точность определения границ водосборных бассейнов.

2) Создания цифровой модели рельефа на основании топографических карт территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

3) Выделения водосборных бассейнов с использованием ГИС-технологий на основе ЦМР. Эта методика использует стандартные ГИС-технологии. Но она применена к ЦМР, созданной по данным спутниковой съёмки поверхности Земли и модифицированной по разработанной методике. Также эта методика применена для выделения водосборных бассейнов с помощью ЦМР, созданных на основании топографических карт.

4) Определения зон различного хозяйственного использования и ландшафтных таксонов с использованием данных ГИС-ассоциации России и проекта OpenStreetMap (OSM). Новизна заключается в модификации стандартных методик для их применения в условиях урбанизированных территорий.

5) Картометрических измерений в среде ГИС с использованием модифицированных ЦМР и топографических карт для определения уклонов поверхности водосборных бассейнов.

6) Картометрических измерений в среде ГИС для определения густоты речной сети водосборных бассейнов.

7) Определения обобщённой за ряд лет внутригодовой динамики модулей стока соединений азота и фосфора с водосборов-аналогов на основании данных мониторинга расходов воды и химического состава стока соответствующих водотоков.

8) Определения обобщённой внутригодовой динамики поступления соединений азота и фосфора с частных водосборных бассейнов Невской губы и восточной части Финского залива.

9) Определения годового поступления соединений азота и фосфора с распределённым стоком с прибрежных водосборных бассейнов Санкт-Петербурга: с северного и южного побережий Невской губы, примыкающей к Невской губе территории Приморского района, западных частей Васильевского острова и острова Декабристов, примыкающих к реке Екатерингофке и акватории Морского Торгового порта территорий Адмиралтейского и Кировского районов Санкт-Петербурга и острова Котлина.

10) Определения годового поступления соединений азота и фосфора

в Невскую губу и восточную часть Финского залива с очищенными стоками канализационных очистных сооружений.

Разработанный подход к определению поступления общего азота и фосфора дополняет уже существующий, примененный в модели биогенной нагрузки ILLM (Institute of Limnology Load Model), предназначенной для расчетов поступления общего азота и фосфора в водные объекты с их водосборов (Кондратьев и др., 2018).

Рассчитанные модули стока общего азота и фосфора с неучитываемых при мониторинге частных водосборов Невской губы и восточной части Финского залива значительно превышают максимально допустимые в соответствии с нормами Nelcom и рассчитанные для всей российской части водосборного бассейна с помощью ILLM. Это может быть связано с высокой долей урбанизации водосборных бассейнов на территории Санкт-Петербурга и его окрестностей.

Теоретическая и практическая значимость работы. Основным вкладом данного исследования в совершенствование мониторинга водных систем является разработка методики определения модулей стока субстанций с водосборов, поверхностный сток с которых не исследуется при мониторинге. Эта методика была применена для определения поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга. Следует отметить, что разработанная методика не требует необходимости расширения существующей сети гидрохимических и гидрологических наблюдений.

Результаты исследования могут быть применены при определении экологически обоснованных норм антропогенного воздействия на водные экосистемы.

Интерес к исследованию проявили СЗУГМС, Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга и ГУП «Водоканал» Санкт-Петербурга. Была получена грантовая поддержка РФФИ совместно с СПбНФ № 23-27-10011.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается использованием: большого количества данных мониторинга СЗУГМС с 1980 года, разработкой авторских цифровых моделей рельефа, сравнением результатов выделения границ водосборных бассейнов с помощью ГИС QGIS и ArcGIS. Для верификации результатов расчетов модулей стока соединений азота и фосфора на основании метода водосборов-аналогов нами было проведено полевое исследование для определения модулей стока соединений азота и

фосфора с водосборов р. Красненькой с Лиговским каналом; Дудергофского канала с притоками. Результаты этого исследования были сопоставлены с результатами расчётов модулей стока для этих же водосборов на основании метода водосборов-аналогов. Рассчитанные модули стока соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с неучитываемых при мониторинге водосборов сравнивались с модулями стока для водосборов с различной степенью хозяйственного преобразования по данным российских и зарубежных авторов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.6.21 «Геоэкология», пункт 3,4,6,14,16.

Апробация и реализация результатов исследования. Основные результаты диссертации были доложены на следующих конференциях и форумах:

- 1) 10-я международная научно-практическая конференция «Экология речных бассейнов. (Владимир, 2021 год)
- 2) II-я Всероссийская междисциплинарная научно-практическая конференция «Крымская инициатива – Экологический Форсайт 2030» (Симферополь, 2022)
- 3) Международная научно-практическая конференция «Географические аспекты устойчивого развития регионов» (Гомель, 2023 год)
- 4) Международная конференция «ИнтерКарто. ИнтерГИС 29» (2023-2025 год)
- 5) XXIII Международный экологический форум «День Балтийского моря» (Санкт-Петербург, 2023 год)
- 6) Международная научная конференция памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен» (Санкт-Петербург, 2023-2025 год)
- 7) VII Всероссийская конференция с международным участием «Гидрометеорология и экология» им. Л.Н. Карлина (Санкт-Петербург, 2023 год)
- 8) Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2021-2026 год)
- 9) 24th International Scientific Multidisciplinary Conference on Earth and Planetary Sciences SGEM 2024 (Альбена, Болгария, 2024 год)
- 10) Всероссийская конференция с международным участием «Гидрология и управление водными ресурсами» (Санкт-Петербург, 2024 год).

Личный вклад автора. Тема представленной диссертации является инициативной. Автором в ходе подготовки выпускных работ по образовательным программам бакалавриата и магистратуры выполнено исследование уровня загрязнённости водных объектов СПб. Освоены методики по самостоятельному гидрохимическому исследованию водотоков, сбору и обработке данных мониторинга водных объектов Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗУГМС). В среде ГИС по разработанной авторской методике были выделены водосборы всех впадающих с территории СПб в Невскую губу и восточную часть Финского залива водотоков. Проведено определение пространственной структуры всех изучаемых водосборов с использованием данных ГИС-ассоциации РФ. Подготовлены данные для выполнения численных экспериментов с компьютерной моделью функционирования экосистемы Невской губы без учёта и с учётом поступления азота и фосфора с её частных водосборов.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 22 научные работы, в том числе 3 публикации (K2) в рецензируемых журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ и 7 публикаций в материалах конференций, индексируемых в Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников. Работа содержит 153 страницы основного текста, 34 таблицы, 29 рисунков. Список использованных источников включает 111 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во *Введении* обоснована актуальность темы, кратко изложены предмет и объект исследований, структура диссертации, сформулированы цель и задачи работы, определена научная и практическая значимость проведённых исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также описан личный вклад автора.

В *первой главе* описаны особенности эвтрофирования гидросферы из-за антропогенного воздействия. Показана глобальность проблемы и необходимость её решения на международном уровне.

Во *второй главе* описана глобальная проблема урбанизации. Размещение городов и населения в целом в мире тяготеет к водным объектам. Так, более половины населения планеты проживают не далее 200 километров от морского побережья (UNEP. GEO-5, 2012). Это приводит к повышенным нагрузкам на прибрежные морские экосистемы.

Специфика Балтийского моря заключается в наличии обширного водосборного бассейна, расположенного в пределах ряда стран с развитой

промышленностью и сельским хозяйством. Это определяет высокую степень антропогенной нагрузки на экосистему моря. В странах Балтийского региона доля городского населения выше, чем среднемировая. Для некоторых стран доля городского населения выше средневропейской (таблица 2.1. диссертации). Такие особенности приводят к повышенной антропогенной нагрузке на экосистему Балтийского моря.

Санкт-Петербург – самый крупный мегаполис на побережье Балтийского моря. Наш город имеет обширную гидрографическую сеть, поэтому его водные объекты особенно подвержены загрязнению.

В *третьей главе* приводится обзор источников и путей поступления соединений азота и фосфора в водные экосистемы с урбанизированных территорий.

В разделе 3.1. главы приводится обзор системы очистки сточных вод Санкт-Петербурга. Приводится история очистки сточных вод в нашем городе.

В разделе 3.2. главы подробнее рассматривается система очистки хозяйственно-бытовых сточных вод Санкт-Петербурга. Очистные сооружения города позволяют очистить хозяйственно-бытовые сточные воды в составе стоков комбинированной ЦСВ до норм, предусмотренных Helscom (10 и 0,5 мг/л для общего азота и фосфора). В Санкт-Петербурге 99,7 % хозяйственно-бытовых сточных вод проходят очистку перед сбросом (Водоканал СПб. 2024).

Раздел 3.3. содержит описание очистки сточных воды промышленных предприятий. Стоки промышленных предприятий, как правило, не содержат в большом количестве соединения азота и фосфора и поэтому не являются основным источником поступления соединений азота и фосфора, угрожающих Балтийскому морю эвтрофированием его экосистем.

Раздел 3.4. главы посвящен описанию систем сбора и очистки поверхностного стока. Водосборная площадь, с которой осуществляется сбор поверхностного стока, отличается разнообразием типов поверхностей. По этой причине химический состав сбросов ливневой канализации отличается большим разнообразием. В связи с многочисленностью выпусков поверхностных сточных вод в водные объекты без очистки они являются значимым источником поступления соединений азота и фосфора в Балтийское море и являются источником его антропогенного эвтрофирования.

В разделе 3.5. главы представлен обзор проблемы поступления соединений азота и фосфора с рассредоточенным площадным стоком в водные объекты как в Санкт-Петербурге, так и в других регионах. Концентрации субстанций в поверхностном стоке с урбанизированных территорий в разных странах близки между собой (таблицы 3.4 и 3.5 диссертации). По-

ступление загрязняющих веществ с поверхностным стоком в водные объекты урбанизированных территорий является острой экологической проблемой во многих странах.

В разделе 3.6. приведены данные о концентрациях соединений азота и фосфора в атмосферных осадках в разных странах. Они приведены в таблицах 3.7 и 3.8 диссертации. Наиболее близки значения концентраций соединений азота и фосфора в атмосферных осадках, выпадающих рядом с акваторией Невской губы и восточной частью Финского залива, в Польше, на Валдае и в Ленинградской области. Также были проведены собственные исследования определения концентраций соединений азота и фосфора в атмосферных осадках при проведении практических занятий с обучающимися ГБУДО ДТ «У Вознесенского моста». Были рассчитаны осредненные значения выпадений общего азота и фосфора на акваторию Невской губы и восточной части Финского залива. Выпадение общего азота составило 809,377 тонн в год, фосфора 80,942 тонн в год. В среднем за год в данную акваторию с атмосферными осадками поступает дополнительно около 8 % общего фосфора и около 2 % общего азота от стока реки Невы и её рукавов.

В четвертой главе приведены значения модулей стока соединений азота и фосфора с водосборов разной степени хозяйственного преобразования. Модули поступления общего азота и фосфора с водосборов разной степени урбанизации и хозяйственного преобразования представлены в таблице 4.1. диссертации. По результатам исследований А.А. Ершовой, 2013; С.А. Кондратьева, 2011 и 2018; П.А. Лозовик, 2016; Б.В. Чубаренко, 2017; модули стока общего азота и фосфора с водосборов с высокой степенью урбанизации (Петрозаводск, Красненькая, Луга, Ижора) значительно превышают нормы Helcom (План действий по Балтийскому морю (ПДБМ) Baltic Sea Action Plan, 2021) и аналогичные модули для других водосборов с меньшей степенью антропогенного преобразования (Сестра, Систа, Коваши, Караста). Результаты авторских исследований по определению модулей стока общего азота и фосфора для городских водосборов реки Охты и Волковки дают близкие значения.

Зарубежными учеными (Brylinsky M., Janke Benjamin D., Butler and Davies, Jolankai G.) проведены исследования поступления общего азота и фосфора с водосборных бассейнов США, Канады и Англии с разной степенью антропогенного преобразования. Эти водосборы расположены в сходных физико-географических условиях с водосборами средней полосы России и Северо-Запада. Зарубежные и отечественные авторы приходят к близким выводам и значениям модулей стока азота и фосфора с водосборов со сходными природно-климатическими условиями и степенью антропогенного преобразования.

В главе показана роль норм Helcom для восстановления экологического благополучия экосистемы Балтийского моря (Baltic Sea Action Plan, 2021). Величины максимально допустимого антропогенного поступления общего азота и фосфора в 2007 году для ПДБМ были получены с помощью физико-биогеохимической модели устойчивого состояния морской экосистемы SANBALTS (Savchuk and Wulff, 2007). Для пересмотра ПДБМ использовалась другая физико-биогеохимическая модель BALTSEM тех же авторов (Wulff et al., 2013).

В главе 5 приводится описание объектов и методов исследования. В разделе 5.1 представлен краткий обзор системы мониторинга поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива со стоком водотоков Санкт-Петербурга, проводимой Северо-Западным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗУГМС). Показано, что существующая оценка поступления общего азота и фосфора со стоком водотоков Санкт-Петербурга не является полной.

В разделе 5.2 приводится описание объектов исследования. В качестве объектов исследования были выбраны водосборы, биогенный сток с которых не учитывается при определении поступления азота и фосфора в Невскую губу и Финский залив с территории Санкт-Петербурга. Они показаны на рис. 1. Для ориентировочного определения объемов поступления соединений азота и фосфора со всех этих водосборов в Невскую губу и восточную часть Финского залива были использованы результаты мониторинга химического состава и расходов стока на реках аналогах (рис. 1).

В разделе 5.3 представлена схема разработанной автором методики определения модулей стока общего азота и фосфора с водосборов, сток с которых не учитывается при оценке поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и Финский залив с территории Санкт-Петербурга (рис. 2).

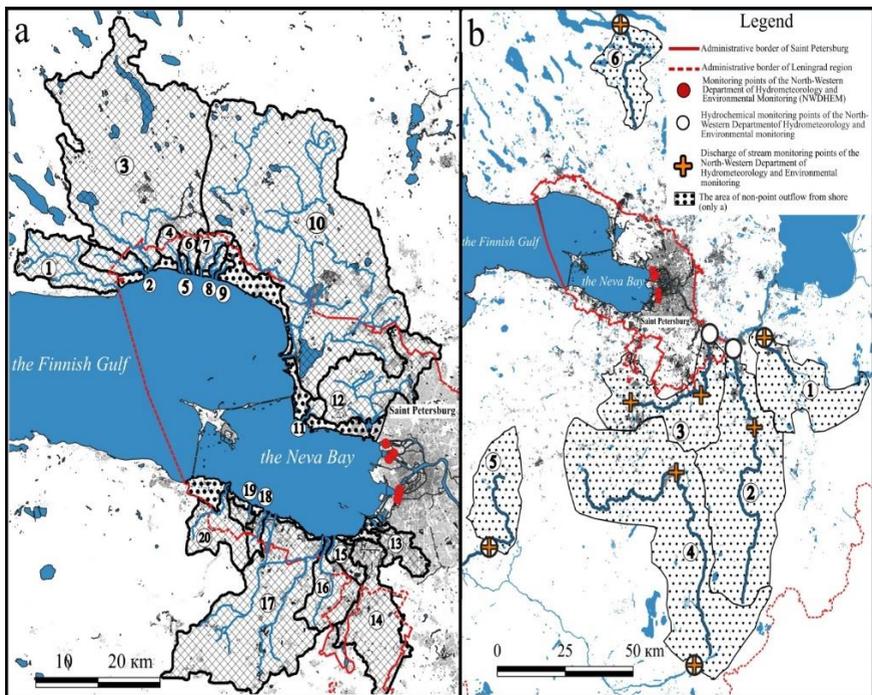


Рисунок 1. Водосборы Невской губы и восточной части Финского залива, а также их аналоги.

Изображение а: Водосборы: 1) р. Приветная, 2) Смолячков ручей, 3) р. Чёрная, 4) Ушковский ручей, 5) Восьмой ручей, 6) р. Быстрая, 7) Зеленогорский ручей, 8) Шестой ручей, 9) Третий ручей, 10) Сестрорецкий Разлив, 11) р. Чёрная (Лахта), 12) Лахтинский Разлив, 13) Лиговский канал и р. Красненькая, 14) р. Дудергофка и Дудергофский канал, 15) ручей Стрелка, 16) р. Кикенка, 17) река Шингарка и Стрелка, 18) Троицкий ручей, 19) р. Кристателька, 20) р. Караста. Изображение б (водосборы водотоков-аналогов): 1) р. Мга, 2) р. Тосна, 3) р. Ижора, 4) р. Оредеж, 5) р. Вруда, 6) р. Волчьа

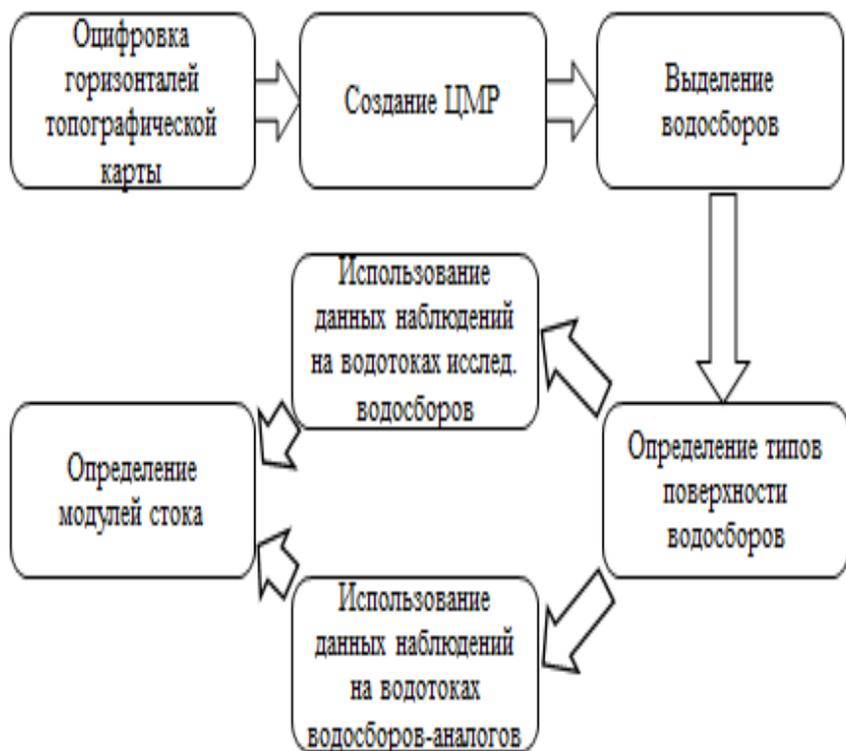


Рисунок 2. Блок-схема методики определения модулей стока

Подраздел 5.3.1 посвящен обзору характеристик популярных цифровых моделей рельефа (ЦМР), которые можно использовать для выделения водосборных бассейнов водных объектов.

Сравнительные характеристики глобальных моделей рельефа и разработанной нами ЦМР представлены в таблице 3.

Для нашего исследования указанные в таблице глобальные ЦМР не могли быть применены: SRTM – из-за пространственного разрешения, WorldDEM – из-за отсутствия свободного доступа. ASTER GDEM требует значительной модификации для применения к водосборам водных объектов Санкт-Петербурга.

Таблица 3. Сравнительные характеристики цифровых моделей рельефа

Название	ASTER GDEM	SRTM	WorldDEM	Авторская ЦМР
Пространственный охват	83° с.ш.–83° ю.ш.	60° с.ш.–54° ю.ш.	90° с.ш.–90° ю.ш.	СПБ и Лен. область
Пространственное разрешение	90 м	90 м	12 м	100 м
Метод съемки/получения	Инфракрасная съемка	Радиолокационная съемка	Радиолокационная съемка	Оцифровка изолиний топографической карты
Возможность свободного доступа	Да	Да	Нет	Исходную топографическую карту можно найти в свободном доступе

В подразделе 5.3.2 приводится описание процесса создания авторской цифровой модели рельефа на основе топографической карты Санкт-Петербурга и Ленинградской области 2001 г. масштабом 1:200000 для выделения водосборных бассейнов в среде ГИС QGIS.

Выделение водосборных бассейнов выполнено инструментом ArcGIS «Watershed». Созданная в результате интерполяции ЦМР была модифицирована с использованием инструмента «Fill». В результате были получены растры направлений стока «Flow Direction». Выделение водосборных бассейнов выполнялось на основании этих растров выше по течению от узловых точек, расставляемых «вручную» в устьях водотоков. Созданные в результате растры принадлежности ячеек к частным водосборам преобразовывались в векторные полигональные слои с помощью инструмента ArcGIS «Conversion tools». Далее полигоны частных водосборов объединялись в полигоны водосборов отдельных речных систем.

В подразделе 5.3.3 приводится описание авторской модификации ЦМР ASTER GDEM для выделения урбанизированных водосборных бассейнов. Это второй подход для выделения водосборных бассейнов. Такая модификация была нами выполнена для выделения водосборных бассейнов рек Волковки, Красенькой, Дудергофки, Лиговского и Дудергофского ка-

налов и частного водосбора реки Охты ниже плотины Ржевского водохранилища. Модификация связана с искажением высот поверхности Земли от тех объектов, которые на ней расположены. В результате модификации ЦМР ASTER были убраны искажения высот ячеек модели из-за зданий и сооружений, локальные понижения и увеличена контрастность ЦМР в местах расположения русел водотоков. В результате преобразований исходной ЦМР повышается точность определения границ водосборных бассейнов.

Дальнейшее выделение водосборных бассейнов было выполнено инструментом ArcGIS «Watershed» аналогично тому, как это выделение производилось с помощью ЦМР, созданной на основании топографической карты.

Подраздел 5.3.4 посвящен сравнению результатов определения границ водосборов разными методами. Границы водосборных бассейнов р. Дудергофки и Дудергофского канала с притоками, Лиговского канала и р. Красненькой были определены с использованием двух разных методов (разд. 5.3.2. и 5.3.3). Результаты расчётов в среде ГИС площадей водосборных бассейнов представлены в таблице 4.

Таблица 4. Сравнение площадей водосборов, выделенных на основании ЦМР ASTER GDEM^a и авторской ЦМР^b

Водосборы	Площадь ^a , км ²	Площадь ^b , км ²	Различие, %
Лиговского канала и р. Красненькой	31.6	34.6	9
р. Дудергофки и Дудергофского канала	126.7	134.9	6

Различия в определении границ водосборных бассейнов с использованием разных ЦМР являются относительно незначительными. Показана возможность использования для определения границ водосборных бассейнов модифицированной автором ЦМР ASTER GDEM и авторской ЦМР, созданной на основе топографической карты.

Подраздел 5.3.5 посвящен описанию методики определения модулей стока с водосборов, на водотоках которых отсутствует мониторинг, и их внутригодовой динамики. Для учета поступления азота и фосфора с таких водосборов необходимо знать их площади и модули стока субстанций с них. Площади водосборов определяются в среде ГИС. Модули стока были заданы равными модулям стока с водосборов-аналогов, на водотоках которых выполняется мониторинг химического состава речного стока и расходов воды. В качестве водосборов-аналогов были приняты водосборы рек Мги,

Тосны, Ижоры, Оредежа, Вруды и Волчьей. Для повышения точности расчетов применялись модули стока с тех водосборов-аналогов, характеристики которых наиболее близки к характеристикам исследуемых водосборов. Степень близости исследуемых водосборов к водосборам-аналогам определялась с помощью кластерного анализа по сходству пространственной структуры водосборов. В качестве параметров водосборов использованы: лесистость, доля площади болот и влажных местообитаний, доля площади сельскохозяйственных земель, доля площади селитебных территорий, доля площади промышленных зон. Кроме них, в качестве параметров кластерного анализа использованы густота речной сети, озёрность и средний уклон водосбора.

Кластерный анализ выполнен с помощью программы Statistica Statsoft. Модули стока соединений азота и фосфора с исследуемых водосборов одной группы были приняты равными модулям стока с водосбора-аналога данной группы водосборов. Если в группу входило более одного водосбора-аналога, то в качестве модулей стока были приняты средние значения модулей всех водосборов-аналогов этой группы.

Для определения модулей стока соединений азота и фосфора с водосборов-аналогов были использованы данные гидрохимического и гидрологического мониторинга Отдела государственного фонда данных СЗУГМС за 1980-1989 гг.

Поскольку Невская губа имеет короткий период условного водообмена (около 5-6 суток), то были определены внутригодовые динамики модулей стока соединений азота и фосфора. Для этого в таблицы Microsoft Excel заносились значения ежедневных значений расхода воды из ежегодников СЗУГМС и рассчитанные с помощью линейной интерполяции в среде компьютерной алгебры Mathcad ежедневные значения концентраций соединений азота и фосфора. На основании этих данных была определена обобщенная внутригодовая динамика модуля стока субстанции с данного водосбора-аналога.

В подразделе 5.3.6 приводится сравнительный анализ методик расчетов поступления общего азота и фосфора с водосборов. Сравнивается авторская методика и подход, используемый в модели биогенной нагрузки с российской части водосбора Финского залива ILLM (Institute of Limnology Load Model) (Кондратьев, 2018). Ограничения и преимущества авторской методики и методики модели ILLM представлены в таблице 5.5. диссертации.

В подразделе 5.3.7 приводится методика оценки поступления азота и фосфора с поверхностным стоком с ряда территорий Санкт-Петербурга: части Приморского района, западной части Васильевского острова и острова Декабристов, островов Гутуевского, Канонерского, Белого, примыкающих

к реке Екатерингофке и акватории Торгового порта частей Адмиралтейского и Кировского районов Санкт-Петербурга, г. Кронштадта, т.е. восточной части о. Котлин. С помощью ГИС были выделены границы этих территорий, определена их общая площадь и типы поверхностей. Частный водосборный бассейн реки Охты по своему пространственному строению сходен с примыкающими к Невской губе с востока территориями Санкт-Петербурга и территорией о. Котлин (таблица 5.8). По этой причине модули стока соединений азота и фосфора с частного водосборного бассейна реки Охты были использованы для расчётов поступления этих субстанций с примыкающих к Невской губе с востока территорий Санкт-Петербурга и с о. Котлин (табл. 5).

В подразделе 5.3.8 приводится описание верификации методики расчетов модулей стока субстанций. Для этого были выполнены полевые исследования стока соединений азота и фосфора с водосборов р. Красненькой с Лиговским каналом и Дудергофского канала с Дудергофкой, а также расчеты стока этих субстанций с данных водосборов по авторской методике. Модули стока соединений азота и фосфора по результатам полевых исследований и рассчитанные по авторской методике были сравнены между собой.

Таблица 5. Сравнение пространственного строения частного водосбора р. Охты (1) и примыкающих к Невской губе с востока территорий Санкт-Петербурга и о. Котлин (2)

Типы поверхности	1	2
	Доля от общ. площади, %	
Древесная растительность и кустарники	10,0	6,8
Болота и влажные местообитания	0	1,3
Сельскохозяйственные угодья	0	<0,1%
Селитебные территории	75,0	70,7
Промышленные зоны	15,0	22,4

В разделе 5.4. описана подготовка данных для компьютерной имитации функционирования экосистемы Невской губы без учёта и с учётом поступления азота и фосфора с ее частных водосборов. Компьютерная имитация функционирования экосистемы Невской губы позволяет оценить влияние дополнительного поступления соединений азота и фосфора с ее частных водосборов, которые в значительной мере урбанизированы. Суть исследования заключается в сравнении результатов численных эксперимен-

тов без учета и с учетом поступления субстанций в Невскую губу с ее неучитываемых частных водосборов. Для оценки степени различия результатов применялась модификация критерия Нэша-Сатклиффа.

В главе 6 приводятся результаты исследования. В разделе 6.1 представлена обобщенная внутригодовая динамика суточных модулей стока азота и фосфора с водосборов-аналогов. Внутригодовая динамика для разных водосборов-аналогов имеет явные различия, но отчетливо выделяется пик высоких значений во время весеннего половодья. Есть некоторое увеличение суточных модулей стока в октябре-декабре. Оно связано с осенним паводком. Определение значимости различий внутригодовых динамик модулей стока азота и фосфора с различных водосборов было выполнено с помощью модифицированного критерия Нэша-Сатклиффа. Было выполнено сравнение внутригодовых динамик модулей стока с одного и того же водосбора за разные годы и сравнение обобщенных внутригодовых динамик модулей стока с разных водосборов. Применение этого критерия показало существенные различия всех внутригодовых динамик.

Раздел 6.2 содержит оценку модулей стока общего азота и фосфора с водосборов водотоков, на которых отсутствует мониторинг. По результатам кластерного анализа были выделены три группы водосборов (рис. 3).

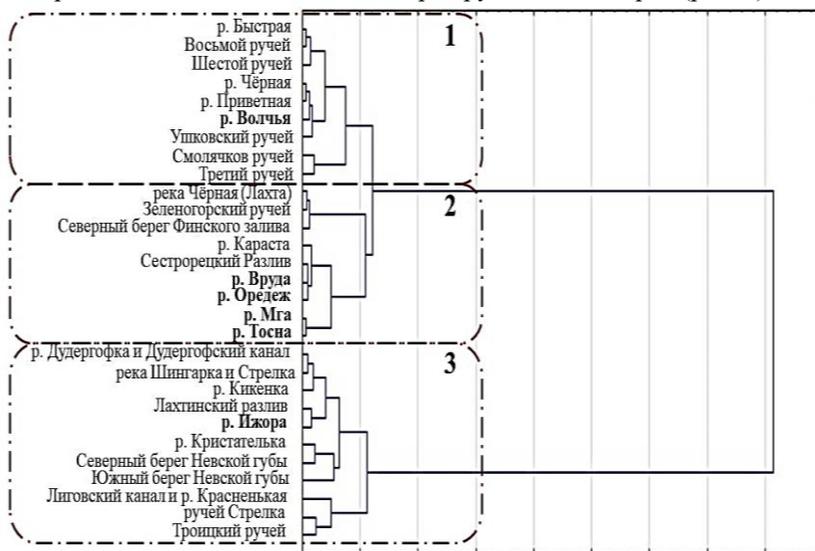


Рисунок 3. Результат кластерного анализа. Жирным шрифтом выделены реки водосборов-аналогов. Показано деление на кластеры 1-3.

Результаты расчётов поступления общего азота и фосфора с неучитываемых при мониторинге водосборов представлены в таблице 6.

Таблица 6. Результаты расчётов поступления общ. азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с неучитываемых водосборов

№ группы	Суммарная площадь водосборов группы, кв. км	Водо-токи-аналоги	Среднее значение модуля стока по водотоку-аналогу (кг/кв. км)		Среднегодовой сток, тонн	
			Общего азота	Общего фосфора	Общего азота	Общего фосфора
1	691,5	Волчья	130,6	11,7	90,3	8,1
2	921,9	Вруда, Оредеж, Мга, Тосна	738,5	43,5	680,8	40,1
3	786,7	Ижора	2416,0	141,4	1900,7	111,2

Сравнение среднегодового поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с неучитываемых при мониторинге водосборов и со стоком реки Невы и её рукавов показано в таблице 7.

Таблица 7. Среднегодовое поступление общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива.

	Среднегодовое поступление в Невскую губу и Восточную часть Финского залива, тонн	
	Общий азот	Общий фосфор
Нева и её рукава 1979-2022	55092	1672
Неучитываемые изучаемые водосборы	2671,8	159,4

Ориентировочное годовое поступление общего азота в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах административной границы

Санкт-Петербурга с водосборов, не учитываемых при оценке баланса биогенных элементов этих акваторий, составляет около 4,8% от годового поступления общего азота со стоком реки Невы. Неучитываемое поступление общего фосфора ещё больше: оно составляет около 9,5% от его поступления со стоком Невы.

В разделе 6.3 представлены результаты оценок поступления азота и фосфора в Невскую губу со стоком реки Красненькой и Дудергофского канала по данным: натурных исследований 2021-2024 гг., ГУП «Водоканал СПб» 2019-2021 гг.; расчётов по авторской методике. Результаты расчетов представлены в таблице 6.4 диссертации.

Сравнение оценок поступления общего азота и фосфора со стоком реки Красненькой и Дудергофского канала (табл. 6.4 диссертации) с поступлением общего азота и фосфора со стоком реки Невы и её рукавов за 1979-2022 гг. (Герман, Серебрицкий, 2023) показывает, что поступление азота и фосфора со стоком реки Красненькой и Дудергофского канала составляет лишь около 1,5 % от поступления общего азота и фосфора со стоком реки Невы и её рукавов.

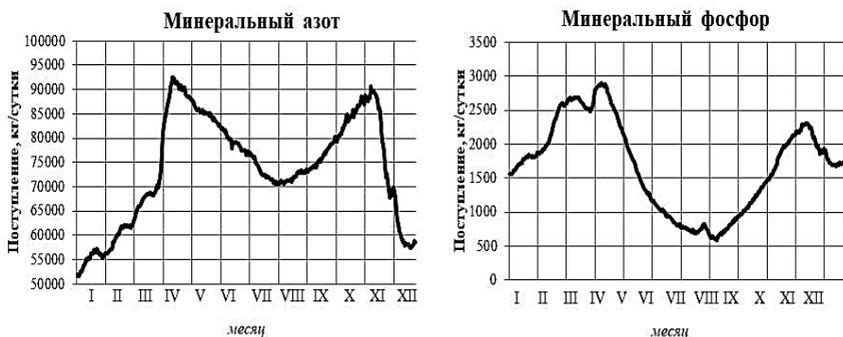
Оценка поступления азота и фосфора, полученная с использованием авторской методики, оказалась ниже оценки, полученной по данным натурных исследований. Возможно, на результаты повлияла небольшая продолжительность натурных исследований.

В разделе 6.4 представлены обобщенные внутригодовые динамики концентраций соединений азота и фосфора в водотоках водосборов-аналогов, использованные для расчетов модулей стока с частных водосборов Невской губы.

В разделе 6.5 представлены внутригодовые динамики и особенности поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу со стоком реки Невы и с частных водосборов Невской губы (рис. 4).

Показано, что средняя доля годового поступления воды в Невскую губу со стоком реки Невы составляет более 99 % от общего поступления воды в ее акваторию, т.е. абсолютное большинство объема воды в Невской губе – это по происхождению невяская вода.

А. Поступление субстанций в Невскую губу со стоком реки Невы



Б. Поступление субстанций в Невскую губу с неучитываемых водосборов

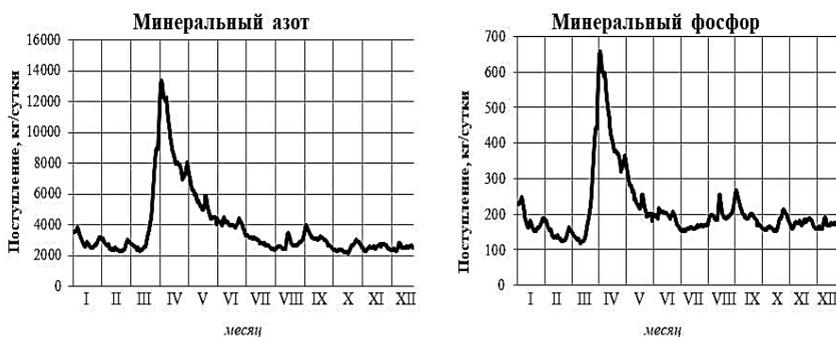


Рисунок 4. Внутригодовая динамика поступления форм азота и фосфора в Невскую губу со стоком реки Невы и с неучитываемых водосборов.

Как показано в таблице 8 концентрации соединений азота и фосфора в стоке с частного водосборного бассейна Невской губы значительно превышают таковые в стоке реки Невы. Так, концентрация минерального фосфора в стоке с водосбора Невской губы превышает таковую в стоке Невы в среднем почти в 20 раз, а минерального азота – почти в 8 раз (табл. 8). Тем не менее, среднее увеличение концентрации в общем притоке в Невскую губу по сравнению с концентрацией в стоке Невы для минерального фосфора составляет 12,5%, а для минерального азота – 4,5 %.

Таблица 8. Среднегодовые концентрации форм азота и фосфора в стоке с неучитываемых при мониторинге водосборов и в стоке р. Невы

	Азот минеральный, мг/л	Фосфор минеральный, мг/л
Неучитываемые водосборы	2,692	0,155
р. Нева	0,340	0,008
Сток в Невскую губу с учётом поступления с водосборов, на которых не осуществляется мониторинг	0,355	0,009

Итоговая концентрация минерального азота и фосфора в стоке в Невскую губу была получена с учетом весов расхода Невы и стока воды с неучитываемых при мониторинге водосборов.

Высокие концентрации соединений азота и фосфора в стоке с неучитываемых при мониторинге водосборов не оказывают значительного влияния на итоговые концентрации форм азота и фосфора в Невской губе. В большей степени влияние на итоговую концентрацию оказывает объём стока.

В разделе 6.6 показано влияние урбанизации на поступление общего азота и фосфора в Невскую губу с неучитываемых при мониторинге водосборов (табл. 9).

Таблица 9. Поступление общего азота и фосфора в Невскую губу с неучитываемых при мониторинге водосборов с учётом урбанизации и без.

	Общий азот	Общий фосфор	Источник
Расчётное среднегодовое фоновое поступление, тонн/год	52,905	3,993	(Осипов и др., 2020)
Расчётное среднегодовое современное поступление, тонн/год	1864,856	92,283	Расчёты автора
Превышение современного поступления над фоновым, разы	35,2	23,1	

Как показано в таблице 9, урбанизация частных водосборов Невской губы увеличивает поступление общего азота и фосфора в Невскую губу, более чем в 35 и 23 раза соответственно. Такое увеличение свидетельствует о значительном влиянии урбанизации на функционирование экосистемы Невской губы.

В разделе 6.7 приводится оценка поступления азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива от очистных сооружений. Расположение очистных сооружений показано на рисунке 6.8 диссертации. В работе показано, что в среднем за год в акватории Невской губы и восточной части Финского залива с очищенными стоками поступает около 6659 тонн общего азота и 525 тонн общего фосфора.

В разделе 6.8 приведены оценки поступления азота и фосфора в Невскую губу от основных источников: стока р. Невы и рукавов, стоков очистных сооружений, стока с неучитываемых при мониторинге частных водосборов Невской губы, с примыкающих к Невской губе с востока территорий Санкт-Петербурга и территорий о. Котлин, с атмосферными осадками.

Поступление общего азота и фосфора в Невскую губу от различных источников показано в таблице 10.

Таблица 10. Поступление общего азота и фосфора в Невскую губу с процентным соотношением долей поступления общего азота (1) и фосфора (2) от всех источников

Источники поступления	Азот общий		Фосфор общий	
	тонн/год	% ¹	тонн/год	% ²
Нева и её рукава 2006-2020	50995,53	85,17	1203,40	64,79
Очистные сооружения	6566,06	10,97	519,27	27,96
Неучитываемые частные водосборы	1864,86	3,11	92,28	4,97
Примык. к Невской губе с востока территории СПб, и о. Котлин	81,67	0,14	6,08	0,33
Атмосферное выпадение	364,71	0,61	36,47	1,96

Из табл. 10 видно, что больше всего азота и фосфора поступает в Невскую губу со стоком реки Невы и её рукавов, а также с очищенными сточными водами.

В разделе 6.9 приведены оценки поступления азота и фосфора в восточную часть Финского залива в границах Санкт-Петербурга от основных источников: поступления из Невской губы, стока очистных сооружений, стока с водосборов неучитываемых при мониторинге водотоков, в составе

атмосферных осадков. В таблице 6.10 диссертации показано, что концентрации соединений азота и фосфора в Невской губе превышают аналогичные значения в мелководной и глубоководной части Финского залива. Наиболее высокие значения концентраций соединений азота и фосфора наблюдаются в Невской губе. Поэтому отсутствует необходимость учета поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу из акватории западнее Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга в качестве внешнего экологического фактора при моделировании функционирования экосистемы Невской губы.

Поступление общего азота и фосфора в восточную мелководную часть Финского залива от разных источников представлено в таблице 11.

Таблица 11. Поступление общего азота и фосфора в восточную мелководную часть Финского залива

Источники поступления	Азот общий	Фосфор общий
	тонн/год	тонн/год
Из Невской губы через КЗС	40045,71	1042,86
Очистные сооружения	92,76	5,64
Неучитываемые изучаемые водосборы	806,94	67,12
Атмосферное выпадение	444,66	44,47

Из таблицы 11 видно, что больше всего (около 97%) общего азота и фосфора в восточную мелководную часть Финского залива поступает из Невской губы. Все остальные источники суммарно приносят только около 3 % общего азота и фосфора от общего поступления.

В разделе 6.10 показана разница между суммарным поступлением общего азота и фосфора в Невскую губу и притоком этих же соединений в восточную мелководную часть Финского залива из Невской губы через комплекс защитных сооружений. Видно, что в Невской губе в среднем поглощается около 19,8 тысяч тонн общего азота и около 815 тонн общего фосфора ежегодно. Азот и фосфор в экосистеме Невской губы поглощается фитопланктоном и бактериопланктоном. И далее субстанции перемещаются по пищевой цепочке и формируют органическую фракцию донных отложений.

В разделе 6.11 показано применение результатов исследования для имитационного компьютерного моделирования функционирования экосистемы Невской губы. Для того, чтобы оценить влияние дополнительного поступления общего азота и фосфора с неучитываемых при мониторинге водосборов была использована модификация компьютерной модели

«EVTOX» («Программа для моделирования антропогенного эвтрофирования и отравления токсикантами водных экосистем», автор – В.Ю. Третьяков). Внешними экологическими факторами модели «EVTOX», с помощью которых имитируется поступление в нее субстанций с притоком воды, служат внутригодовые динамики субстанций в этом притоке, и внутригодовые динамики суточных объемов притока воды. Указанные в разделах 6.8, 6.9 результаты работы были использованы для подготовки внешних экологических факторов модели. Для определения трофического статуса Невской губы были применены классификации Г.Г. Винберга; В.И. Романенко; Б.Л. Гутельмахера (Дмитриев и Фрумин, 2004). Выполнена оценка трофического состояния экосистемы Невской губы по результатам экспериментов без учета дополнительного поступления соединений азота и фосфора с неучитываемых при мониторинге водосборов и с их учетом на основе значений ряда компонентов и интенсивностей процессов модели. С помощью модели «EVTOX» показано, что нет различий в функционировании экосистемы Невской губы с учетом и без учета дополнительного поступления соединений азота и фосфора.

ВЫВОДЫ

- 1) По результатам анализа отечественных и зарубежных источников показана важность проблемы антропогенной эвтрофикации Мирового океана. Балтийское море из-за замедленного водообмена и высокой доли урбанизации водосбора особенно страдает от антропогенной эвтрофикации.
- 2) Как показано в литературе, основными источниками поступления соединений азота и фосфора в водные экосистемы являются сточные воды, атмосферные осадки и рассеянный поверхностный сток.
- 3) Анализ публикаций ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» показал, что с 70 % территории города поверхностный сток поступает в общесплавную канализацию и почти на 100 % очищается на очистных сооружениях города. А с 30 % территории города поверхностный сток поступает в дождевую систему водоотведения. К сожалению, из поступивших в эту систему водоотведения вод очищается лишь около 4 %.
- 4) Подсчитано, что в среднем за год в Невскую губу и восточную часть Финского залива с атмосферными осадками поступает дополнительно около 8 % общего фосфора и около 2 % общего азота от стока реки Невы и её рукавов. Эти цифры не входят в оценку поступления общего азота и фосфора в Финский залив с территории Российской Федерации.

- 5) В результате сравнения модулей стока общего азота и фосфора с природных, сельскохозяйственных и урбанизированных территорий было выявлено, что сток общего азота и фосфора с урбанизированных и сельскохозяйственных территорий, как правило, превышает нормы Nelcom.
- 6) Разработана методика оценки поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах административной границы Санкт-Петербурга с водосборов, неучитываемых при оценке баланса биогенных элементов этих акваторий. Методика основана на применении цифровых моделей рельефа, ГИС-технологий, данных гидрохимического и гидрологического мониторинга водосборов-аналогов, кластерного анализа, применении модифицированного критерия Нэша-Сатклиффа.
- 7) Ориентировочное годовое поступление общего азота в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах административной границы Санкт-Петербурга с водосборов, неучитываемых при оценке баланса биогенных элементов этих акваторий составляет около 4,8% от годового поступления общего азота со стоком реки Невы. Неучитываемое поступление общего фосфора ещё больше: оно составляет около 9,5% от его поступления со стоком Невы.
- 8) По результатам исследования установлено, что модули стока с неучитываемых при мониторинге водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга, значительно превышают максимально допустимые исходя из норм Nelcom. Рассчитанные нами модули составили 1,113 и 0,066 тонн/км² в год общего азота и фосфора соответственно при максимально допустимых нормах Nelcom 0,236 и 0,011 тонн/км² в год.
- 9) Существующая оценка СЗУГМС поступления азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах Санкт-Петербурга учитывает большую часть этого поступления. Однако эта оценка может быть дополнена и уточнена результатами нашего исследования. К существующей оценке поступления общего азота и фосфора следует добавить ещё около 7 и 16 % для общего азота и фосфора соответственно. Это дополнительное поступление с неучитываемых при мониторинге водосборов и с атмосферными осадками.

Публикации автора по теме диссертации

- 1) *Клубов С.М., Третьяков В.Ю.* Сток биогенных элементов и загрязняющих веществ с городских водосборов // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 3, №30. С. 217-227 (ВАК, К2)
- 2) *Клубов С.М., Третьяков В.Ю., Дмитриев В.В.* Особенности поступления биогенных элементов с водосборного бассейна городской реки // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2022. Т. 8. №4. С. 175-181 (ВАК, К2)
- 3) *Клубов С.М., Третьяков В.Ю.* Оценка загрязненности вод рек СПб с использованием отчетных материалов ГУП «Водоканал СПб» в 2018 году // Ученые записки КФУ им. В.И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т.5. №3. С. 160-174 (ВАК, К2)
- 4) *Klubov S.M., Tretyakov V.Yu., Rozhkova J. O., Dmitriev V.V.* Watershed of a small river as source of contaminants and biogenic elements // E3S Web of Conferences 265, 05002 (2021) Actual Problems of Ecology and Environmental Management (APEEM 2021) p. 1-5 (Scopus)
- 5) *Victor Tretyakov, Vasiliy Dmitriev, Ulyana Streltsova, Stepan Klubov, Iuliia Rozhkova* Changes in aquatic ecosystems trophic and ecological state parameters with various anthropogenic impacts based on simulation // SGEM2021, 2021., №21., С. 67-74. DOI: 10.5593/sgem2021/5.1/s20.009 (Scopus)
- 6) *Klubov S.M., Tretyakov V.Yu., Dmitriev V.V., Nikulina A.R.* Methodology for urbanized watersheds parameters ascertainment // E3S Web of Conferences 407, 02002 (2023) APEEM 2023, p. 1-7 (Scopus)
- 7) *Клубов С.М., Третьяков В.Ю., Дмитриев В.В., Никулина А.Р.* Методика выделения водосборов СПб для определения поступления общ. азота и фосфора в Невскую губу и Восточную часть Финского залива // Интеркарто. Интергис 29, 2023. С. 304-317 (Scopus)
- 8) *Victor Tretyakov, Vasiliy Dmitriev, Stepan Klubov, Anna Nikulina.* Ascertainment of urbanized watersheds parameters for evaluation of biogenic elements outflow. // SGEM2023, 2023, №23, С. 67-74. DOI: 10.5593/sgem2023/2.1/s08.17 (Scopus)
- 9) *Victor Tretyakov, Vasiliy Dmitriev, Stepan Klubov, Anna Nikulina.* Methodology of total phosphorus and nitrogen outflow unit discharges evaluation for watersheds without monitoring points // SGEM 2023. Volume 23. Issue: 3.2. DOI: 10.5593/sgem2023V/3.2/s12.20 (Scopus)