

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
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)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Научный руководитель:  
кандидат географических наук,  
доцент,  
Третьяков Виктор Юрьевич

Санкт-Петербург – 2025

## Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Эвтрофирование внутренних водоёмов и морских акваторий в 20-21 веках.....	21
Глава 2. Процесс урбанизации в XX и XXI веках .....	35
Глава 3. Источники и пути поступления соединений азота и фосфора в водные экосистемы с урбанизированных территорий.....	39
3.1. Система очистки сточных вод Санкт-Петербурга.....	46
3.2. Сбросы хозяйственно-бытовых вод Санкт-Петербурга.....	49
3.3. Сбросы промышленных предприятий. ....	51
3.4. Сбросы ливневой канализации.....	53
3.5. Рассредоточенный площадной сток.....	54
3.6. Поступление соединений азота и фосфора с выпадениями атмосферных осадков.. ..	57
Глава 4. Модули стока соединений азота и фосфора с природных, сельскохозяйственных и урбанизированных территорий по литературным источникам.....	60
Глава 5. Объекты и методы исследования.....	68
5.1. Особенности мониторинга поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского со стоком водотоков Санкт-Петербурга.....	68
5.2. Объекты исследования. ....	69
5.3. Методика определения модулей стока соединений азота и фосфора с водосборов. ....	71
5.3.1. Использование цифровых моделей рельефа для выделения водосборных бассейнов.....	71
5.3.2. Создание авторской цифровой модели рельефа по топографической карте для выделения водосборных бассейнов. ....	73
5.3.3. Модификация цифровой модели рельефа ASTER GDEM для выделения урбанизированных водосборных бассейнов. ....	77

5.3.4. Сравнительный анализ результатов определения границ водосборов разными методами. ....	81
5.3.5. Определение модулей стока с водосборов, на водотоках которых отсутствует мониторинг, и их внутригодовой динамики. ....	84
5.3.6. Сравнительный анализ методик расчетов поступления азота и фосфора с водосборов.....	88
5.3.7. Подход к оценке поступления азота и фосфора в Невскую губу с распределённым стоком с прибрежных урбанизированных территорий Санкт-Петербурга. ....	95
5.3.8. Верификация методики расчетов модулей стока субстанций .....	97
5.4. Подготовка данных для компьютерной имитации функционирования экосистемы Невской губы без учёта и с учётом поступления азота и фосфора с её частных водосборов.....	99
<b>Глава 6. Результаты исследования. ....</b>	<b>103</b>
6.1. Внутригодовая динамика модулей стока соединений азота и фосфора с водосборов-аналогов.....	103
6.2. Оценка модулей стока общего азота и фосфора с водосборов водотоков, на которых отсутствует мониторинг.....	104
6.3. Оценка поступления общего азота и фосфора в Невскую губу со стоком с водосборов р. Красненькой с Лиговским каналом и Дудергофского канала с Дудергофкой. ....	109
6.4. Обобщенная внутригодовая динамика концентраций соединений азота и фосфора в водотоках водосборов-аналогов. ....	112
6.5. Внутригодовая динамика поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу с водами реки Невы и с частных водосборов Невской губы. ....	115
6.6. Влияние урбанизации на поступление азота и фосфора в Невскую губу с неучитываемых при мониторинге водосборов. ....	117

6.7. Поступление азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива от очистных сооружений.....	119
6.8. Особенности поступления азота и фосфора в Невскую губу.....	122
6.9. Особенности поступления соединений азота и фосфора в восточную часть Финского залива в границах Санкт-Петербурга.....	127
6.10. Особенности баланса азота и фосфора Невской губы. ....	131
6.11. Практическое применение результатов исследования для имитационного компьютерного моделирования функционирования экосистемы Невской губы.....	133
Выводы. ....	138
Список использованных источников. ....	141

## 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 (соединения азота и фосфора) на водные экосистемы поступает со сточными водами, атмосферными осадками и диффузным стоком с водосборных бассейнов.

Увеличение численности населения и урбанизация негативно действуют на водные экосистемы. В настоящее время более половины всего населения Земли проживает в городах, и эта доля постоянно увеличивается. Рост городского населения приводит к увеличению площади городов. Урбанизация приводит к разрушению природных экосистем и их загрязнению. Городские поселения издавна располагаются на берегах водных объектов, что приводит к повышенным нагрузкам на их экосистемы. В зарубежной Европе доля городского населения одна из самых высоких в мире (около 75 %). Для стран Балтийского региона (без России) характерен уровень урбанизации (около 80 %), который превышает среднее значение для зарубежной Европы. Поступление субстанций с урбанизированных территорий - определяющих фактор загрязнения и эвтрофикации экосистем водоёмов на водосборном бассейне Балтийского моря и экосистемы самого моря.

Пресноводные экосистемы с высоким уровнем эвтрофирования существуют на всех континентах кроме Антарктиды. Особенно подвержены эвтрофированию пресноводные экосистемы в восточной и юго-восточной Азии, Центральной и Западной Африке и Южной Америке. В Западной Европе ситуация относительно благополучна в связи с тем, что более 90 % населения подключено к централизованной канализации, сельскохозяйственная деятельность регламентируется природоохранным законодательством. За последние 30 лет меры, направленные на снижение рисков эвтрофирования в европейских водоёмах, дали результат. Средние уровни концентраций фосфатов и нитратов в реках снизились соответственно на 57 и 20 % (ЮНЕП,

2024). При этом экологическое состояние многих европейских водоемов неудовлетворительно. Несмотря на достигнутый прогресс снижения содержания соединений азота и фосфора в речных системах, их уровень концентрации по-прежнему достаточно высок и приводит к эвтрофированию прибрежных морских акваторий в местах впадения рек.

Важным фактором, влияющим на процесс эвтрофирования, является изменение климата. Повышение температуры воды вместе с избыточным поступлением соединений азота и фосфора способствует эвтрофикации водных экосистем. Температура воды в крупных европейских реках за последние сто лет выросла на 1—3°C. При этом отмечена общая тенденция повышения температуры воды в реках и озерах Европы на 0,05—0,8 °C за 2010-е гг. (ЮНЕП, 2024).

Изменение климата влияет и на морские экосистемы. Потепление морской воды снижает концентрацию растворённого кислорода. Температура воды влияет на биогеохимические циклы вещества в водных экосистемах и на внутригодовые циклы их функционирования. Потепление воды приводит к изменениям в видовом составе биоты, смене доминирующих видов и эдификаторов.

В Мировом океане насчитывается более 400 прибрежных акваторий, подверженных существенной антропогенной эвтрофикации. Суммарный сток общего азота и фосфора в Мировой океан с конца XX века увеличился приблизительно на 15 %.

При этом за последние десятилетия загрязнение примыкающих к Европе морей токсическими веществами в целом снизилось. Однако поступление антропогенных соединений фосфора и азота остается высоким.

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.

Основная экологическая проблема Балтийского моря заключается в его антропогенном эвтрофировании, чему способствуют его замкнутость, большой объём поступающего речного стока и высокий уровень урбанизации его водосборного бассейна (Klubov and Tretyakov, 2020). К антропогенному эвтрофированию приводит избыточное поступление соединений азота и фосфора (Герман и Серебрицкий, 2023). При эвтрофировании увеличивается биомасса сине-зелёных водорослей, выделяющих опасные токсины, которые, мигрируя по трофической цепи, могут вызывать отравление и даже гибель людей (Фрумин и Каратникова, 2017). Например, в августе 2022 года и в предыдущие годы в Невской губе наблюдалось бурное развитие сине-зеленых водорослей. Такая ситуация возникает, как правило, в июле-августе при максимальном за год прогреве воды. По данным СЗМУ Росприроднадзора, одним из их видов являлась цианобактерия *Microcystis aeruginosa* Kützing (Росприроднадзор, 2022).

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 км<sup>2</sup>, его наибольшие части расположены на территории Швеции – 440040 км<sup>2</sup> (26 %) и России 314800 км<sup>2</sup> (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. Отмечается сложность определения модулей стока субстанций с водосборов в связи с многообразием формирующих этот сток факторов (Ясинский, 2019). Исследователи предлагают 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 озероведения РАН под руководством С.А. Кондратьева. Эта модель отличается большой универсальностью и применимостью к водосборам с большим разнообразием ландшафтов. В модели использованы справочные данные 70-х гг. XX века, т.е. эпохи интенсивного применения в сельском хозяйстве минеральных удобрений и распространения крупных животноводческих комплексов. 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 водных объектов, расположенных на водосборных бассейнах Невской губы и восточной части Финского залива. Подобная оценка приведена в работах Е.В. Степановой. Перечисленные выше исследования посвящены определению естественной составляющей биогенной нагрузки с природных и слабо антропогенезированных водосборов. 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 выполнен 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 упомянуть 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. Приведены эмпирические закономерности интенсивности выноса биогенных элементов с водосборов от количества выпадающих осадков. Результаты получены на базе данных сорока пятидесятилетней давности. Отдельного внимания заслуживают работы японских и американских учёных, посвященные оценке выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных земель. Коллектив японских учёных под руководством Y.W. Feng (Feng et al, 2005) выполнил натурные исследования по оценке выноса биогенных элементов с рисовых полей в Японии. А их коллеги из США под руководством C.D.D. Sohoulande провели исследования выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в Северной Каролине (США) за период 2002-2020 годов (Sohoulande et al, 2022). Большое внимание уделяется анализу внутригодовой динамики выноса биогенных элементов и влиянию пространственного строения водосборов на интенсивность выноса биогенных элементов.

Проблема оценки выноса биогенных элементов с водосборов является глобальной. Прилагаются усилия по определению взаимосвязей между ландшафтным строением водосборных бассейнов и интенсивностью стока биогенных элементов. Выполняются исследования внутригодовых динамик стока субстанций с водосборов с учётом их климатических и ландшафтных особенностей. Разумеется, результаты всех исследований отражают региональную специфику, и поэтому зачастую методика, разработанная для оценки биогенного стока с какого-либо конкретного водосбора является уникальной.

*Цель и задачи исследования.* Цель исследования заключается в оценке объёмов поступления в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории 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 хозяйствственно-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 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.

*Объект исследований.* Объектом 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. Использованы данные гидрохимического мониторинга качества поверхностных вод объектов-приёмников сточных вод ГУП «Водоканал СПб». Приводятся и использованы результаты собственных исследований по определению расходов воды и химического состава 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 нами методик оценено не учитываемое ранее поступление соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива. Это поступление происходит с частных водосборов и атмосферными выпадениями. В Невскую губу оно

составляет ежегодно приблизительно 2311 тонн общего азота и 135 тонн общего фосфора, а в восточную часть 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 1,113 и 0,066 тонн/км<sup>2</sup> в год общего азота и фосфора соответственно. 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 территории Санкт-Петербурга.
- 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) К существующей оценке СЗУГМС поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах Санкт-Петербурга следует добавить ещё 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 нами 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 применяется к ЦМР, созданной по данным спутниковой съёмки поверхности Земли и модифицированной по разработанной нами методике. Также эта методика применяется 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 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 нами подход к определению поступления общего азота и фосфора оказался проще для достижения цели исследования, чем уже существующий, примененный в модели биогенной нагрузки ILLM (Institute of Limnology Load Model). Модель предназначена для расчетов поступления общего азота и фосфора в водные объекты с их водосборных бассейнов. Она разработана в Институте озероведения РАН (Кондратьев и др., 2018).

Рассчитанные нами 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 Helcom 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.

С помощью разработанного автором подхода был выявлен недоучёт поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах Санкт-Петербурга. К существующей оценке СЗУГМС поступления общего азота и фосфора следует добавить ещё около 7 % общего азота и 20 % общего фосфора. Это дополнительное поступление с неучитываемых при мониторинге водосборов и с атмосферными осадками.

*Теоретическая и практическая значимость работы.* Основным вкладом данного исследования в геоэкологию и природопользование 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. За последние 30 лет сеть створов регулярных гидрохимических и гидрологических наблюдений СЗУГМС была существенно сокращена. Есть основания полагать, что в ближайшее время не произойдёт расширения сети створов регулярных наблюдений на водотоках Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Поэтому наши разработки могут быть применены при определении экологически обоснованных норм антропогенного воздействия на водные экосистемы. Более точная и научно-обоснованная оценка поступления общего азота и фосфора в Балтийское море с российской территории позволит противодействовать инсинуациям недружественных государств и

международных организаций, указывающих на Российскую Федерацию как на основную причину его антропогенного эвтрофирования.

Нормы Helcom применяются для приблизительной оценки поступления азота и фосфора с урбанизированных водосборов на основании данных о средней плотности населения на водосборных бассейнах. В настоящее время из-за малого количества створов мониторинга для оценки объёмов поступления соединений азота и фосфора с урбанизированных водосборов применяются недостаточно точные международные нормы поступления этих биогенных элементов.

Интерес к нашему исследованию проявили СЗУГМС, Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга и ГУП «Водоканал» Санкт-Петербурга. Эти организации оказали содействие нашим исследованиям.

#### *Степень достоверности полученных результатов*

Достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается использованием: большого количества данных мониторинга Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды 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 сравнены 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 разной степени хозяйственного преобразования по данным российских и зарубежных авторов.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.* Диссертация соответствует паспорту научной специальности 25.00.36 «Геоэкология (Науки о Земле)», пункт 1.12 «Геоэкологический мониторинг и обеспечение экологической безопасности, средства контроля». Полученные результаты могут быть использованы для уточнения существующей оценки поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива со стоком водотоков Санкт-Петербурга. Также использованные методы и подходы соответствуют пункту 1.14 «моделирование экологических процессов», пунктам 1.9 «оценка состояния, изменений и управление ландшафтами» и 1.18. «научное обоснование государственного нормирования и стандартов в области геоэкологических аспектов природопользования» паспорта научной специальности 25.00.36 «Геоэкология (Науки о Земле)».

*Апробация и реализация результатов исследования.* Основные результаты диссертации были доложены на следующих научных и научно-практических конференциях:

- 1) 10-я международная научно-практическая конференция «Экология речных бассейнов. (Владимир, 2021 год). Тема доклада: «Формирование стока азота и фосфора на урбанизированных водосборах малых рек».
- 2) Ежегодный Биос-форум и Биос-олимпиада (Санкт-Петербург, 2021 год). Тема доклада: «Сравнительный анализ методик подсчёта биогенной нагрузки с российской части водосбора Финского залива».
- 3) Ежегодная международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2022 год). Тема доклада: «Оценка вклада коммунальных служб в снижение поступления общего азота и фосфора в Балтийское море с водосборных бассейнов рек Волковки и Охты Санкт-Петербурга».

- 4) II-я Всероссийская междисциплинарная научно-практическая конференция «Крымская инициатива – Экологический Форсайт 2030» (Симферополь, 2022). Тема доклада: «Особенности поступления биогенных элементов с водосборного бассейна городской реки».
- 5) XXV Санкт-Петербургская Ассамблея молодых учёных и специалистов (Санкт-Петербург, 2022 год). Тема доклада: «Оценка поступления биогенных элементов и загрязняющих веществ с водосборного бассейна малой городской реки (на примере р. Волковки Санкт-Петербурга) с применением ГИС-технологий».
- 6) Международная научно-практическая конференция «Географические аспекты устойчивого развития регионов» (Гомель, 2023 год). Тема доклада: «Внутригодовые динамики содержания соединений азота и фосфора в речном стоке на водосборе Российской части Финского залива».
- 7) Международная конференция «Интеркарто. Интергис 29» «Геоинформационная поддержка устойчивого развития регионов в условиях кризиса» (Улан-Удэ, 2023 год). Тема доклада: «Методика выделения водосборов Санкт-Петербурга для определения поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и Восточную часть Финского залива».
- 8) XXIII Международный экологический форум «День Балтийского моря» и XXII Международный форум «Экология большого города» (Санкт-Петербург, 2023 год). Тема доклада: «Методика оценки поступления биогенных элементов в Невскую губу и восточную часть Финского залива с водосборов, сток с которых не учитывается при мониторинге».
- 9) Международная научная конференция памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен» (Санкт-Петербург, 2023 год). Тема доклада:

«Подходы к определению модулей стока общего азота и фосфора с Российской части водосбора бассейна Балтийского моря».

- 10) VII Всероссийская конференция с международным участием «Гидрометеорология и экология» им. Л.Н. Карлина (Санкт-Петербург, 2023 год). Тема доклада: «Поступление азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с водосборов водотоков, на которых отсутствует мониторинг».
- 11) Международная научно-техническая конференция «Экология и техносферная безопасность» (Сочи, 2024 год). Тема доклада: «Уточнение поступления азота и фосфора в экосистемы Невской губы и восточной части Финского залива».
- 12) Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2024 год). Тема доклада: «Подходы к оценке стока общего азота и фосфора в Невскую губу (на примере реки Красненькая и Дудергофского канала)».
- 13) 24th International Scientific Multidisciplinary Conference on Earth and Planetary Sciences SGEM 2024 (Альбена, Болгария, 2024 год). Тема доклада: «Role of unaccounted sources of total nitrogen and phosphorus in the Neva Bay anthropogenic eutrophication».
- 14) Всероссийская конференция с международным участием «Гидрология и управление водными ресурсами» (Санкт-Петербург, 2024 год). Тема доклада: «Влияние поступления азота и фосфора с частного водосбора Невской губы на функционирование её экосистемы».
- 15) XIX Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2025) (Москва, 2025). Тема доклада: «Особенности эвтрофирования сильнопроточного эстуария по результатам моделирования».

*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 ходе подготовки диссертации были использованы наработки из выпускных работ для создания методики оценки модулей стока азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива с водосборов водотоков, на которых отсутствует мониторинг. Самостоятельно собраны обширные данные результатов гидрохимического мониторинга и расходов воды СЗУГМС, ГУП «Водоканал СПб». Полученные данные были оцифрованы и обработаны. Самостоятельно проведена интерполяция полученных данных для определения внутригодовой динамики стока соединений азота и фосфора в составе речного стока Невы и стока рек водосборов-аналогов. 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 в рецензируемых журналах, рекомендованных 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.

# ГЛАВА 1. ЭВТРОФИРОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ ВОДОЁМОВ И МОРСКИХ АКВАТОРИЙ В 20-21 ВЕКАХ

Гидросфера подвержена антропогенному воздействию, и её экологические проблемы приобрели глобальный характер. Поэтому для их решения создан ряд организаций. Крупнейшими международными организациями по охране водных экосистем планеты являются:

1. Организация объединенных наций. Программа по окружающей среде (ЮНЕП – United Nations Environmental Program)
2. Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО - UNESCO) и другие

Крупнейшими организациями, специализирующими на охране морской среды являются:

1. Межправительственная организация Международная морская организация (IMO – International Maritime Organization);
2. Хельсинская комиссия (Helcom)
3. Некоммерческое общество охраны морской фауны Sea Shepherd Conservation Society («Морской пастух»)
4. Негосударственная ассоциация по охране, сохранению окружающей среды Красного моря (НЕРСА)
5. Комиссия по сохранению морских живых ресурсов Антарктики (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR)

Крупнейшими организациями, специализирующими на охране поверхностных вод суши являются:

1. Всемирный Водный Совет (World Water Council)
2. Международная сеть бассейновых организаций (International Network of Basin Organizations)
3. Международная комиссия по ирригации и дренажу (International Commission on Irrigation & Drainage)

4. Международное бюро по водным ресурсам (International Office for Water)
5. Международная ассоциация по водным ресурсам (The International Water Association)

В Европе крупнейшими организациями по охране прибрежных морских вод и пресноводных экосистем являются:

1. Европейская экономическая комиссия ООН (The United Nations Economic Commission for Europe)
2. Европейская комиссия (European commission)
3. Союз прибрежных и морских сил (Coastal & Marine Union)
4. Европейский центр по восстановлению рек (European centre for river restoration)

Одним из направлений деятельности европейских природоохранных организаций является охрана водных экосистем от антропогенного загрязнения и эвтрофирования.

В Северо-Западном федеральном округе России с его широкой сетью водотоков и большой озёрностью экологическим мониторингом занимаются такие организации как:

1. Департамент государственной политики и регулирования в сфере охраны окружающей среды и экологической безопасности
2. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
3. Федеральная служба по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор)
4. Федеральное агентство водных ресурсов (Росводресурсы)
5. Невско-Ладожское бассейновое водное управление
6. Департаменты правительства регионов по охране окружающей среды

Деятельность организаций по мониторингу водных объектов даёт важные сведения для планирования природоохранных мероприятий, в т.ч.

направленные на сохранение морской среды российской части Балтийского моря.

Помимо государственных организаций природоохранной деятельностью, направленной на сохранение водных экосистем, занимаются и общественные организации, например, такие как Всероссийское общество охраны природы и Социально-экологический союз.

На международном уровне признаются следующие основные типы антропогенного воздействия на морскую среду (Патин, 2015):

- 1) Сброс сточных вод и твердых отходов
- 2) Атмосферные выбросы
- 3) Водопотребление для орошения.
- 4) Аварийные ситуации
- 5) Разрушение берегов из-за непродуманных изменений береговой черты и строительства береговых сооружений с изменением систем волнения и течений
- 6) Выпадение загрязняющих веществ на акватории
- 7) Тепловое загрязнение
- 8) Сейсморазведка
- 9) Поступление в морскую среду отходов буровых и промысловых работ
- 10) Строительство платформ, терминалов и трубопроводов
- 11) Захоронение конструкций
- 12) Поступление нефти
- 13) Интродукция и акклиматизация вселенцев
- 14) Дноуглубительные работы
- 15) Гидротехническое строительство
- 16) Морской дампинг
- 17) Судоходство
- 18) Рыболовство

Выше перечислен не полный перечень видов антропогенных воздействий, которые приводят к деградации морских экосистем. И большое внимание сохранению гидросфера уделяет Программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП). Разумеется, морские экосистемы находятся в тесной взаимосвязи с пресноводными, и это отражено в Программе ЮНЕП. Поэтому экологические проблемы пресных и морских вод необходимо рассматривать совместно. ЮНЕП призывает международное сообщество сосредоточить свои усилия по сохранению гидросферы на шести основных направлениях:

- 1) Сохранение морских и пресноводных экосистем
- 2) Сохранение и увеличение благосостояния людей
- 3) Повышение эффективности водопользования
- 4) Контроль и повышение качества воды
- 5) Создание и укрепление институциональных и правовых факторов в сфере охраны водных ресурсов
- 6) Управление водными ресурсами

Внутри каждого направления, выделяемого ЮНЕП, есть цели, на достижение которых, по мнению ЮНЕП, должны быть направлены усилия международного сообщества по каждому из выделенных направлений. Некоторые из этих целей представлены в таблице 1.1 (UNEP. GEO-5, 2012). Достижение этих целей в той или иной степени сокращает масштаб и последствия токсического загрязнения и эвтрофирования водных объектов. В таблице представлена оценка состояния дел по достижению целей и перечень международных соглашений, направленных на достижение сформулированных ЮНЕП целей в области охраны гидросферы.

Таблица 1.1 Некоторые цели в области охраны гидросферы от антропогенного воздействия (UNEP. GEO-5, 2012).

№ направления	Цель	Текущее состояние	Международные соглашения
1	Защита и восстановление пресноводных экосистем и их услуг	Половина стран добилась значительного прогресса в разработке и реализации комплексных планов управления водными ресурсами. Неясно, однако, во скольких отражено улучшение управления пресноводными экосистемами.	Йоханнесбургский план выполнения решений (2002), Цели в области устойчивого развития (2015) Конвенция по биоразнообразию (1992) Рамсарская конвенция по водно-болотным угодьям (1972) Международная конвенция о водных путях (1997) Рамочная конвенция ООН по изменению климата (1992) Конвенция по управлению балластными водами (2004) Глобальная проблема действий по защите морской среды от осуществляющей на суше деятельности (1995) Ответственное рыболовство ФАО (1995) Барбадосская программа действий для малых островных развивающихся государств (1994) Принципы Дублина по воде и устойчивому развитию (1992) Региональные морские конвенции и программы Многосторонние соглашения о пресной воде
1	Защита и восстановление морских экосистем и их услуг	Потепление и подкисление океана ускоряется и воздействует на морские экосистемы, особенно коралловые рифы; 415 прибрежных районов эвтрофные, из которых 169 имеют гипоксические мёртвые зоны Существуют 18 региональных конвенций и планов действий с участием 143 стран, которые направлены на улучшение здоровья экосистем, среди других целей; 64 крупные морские экосистемы охватывают прибрежные районы мира, причём некоторые из них эффективно управляются, тогда как по другим недостаток финансирования и обязательств стран-участниц, что приводит к медленному прогрессу.	Йоханнесбургский план выполнения решений (2002), Декларация тысячелетия ООН (2000) Конвенция ООН по морскому праву (1982) Лондонская конвенция по предотвращению загрязнения морской среды (1972) Международная конвенция по предотвращению загрязнения вод МАРПОЛ (1973) Конвенция по биоразнообразию (1992) Рамсарская конвенция по водно-болотным угодьям (1972) Международная конвенция о водных путях (1997) Рамочная конвенция ООН по изменению климата (1992) Конвенция по управлению балластными водами (2004) Глобальная проблема действий по защите морской среды от осуществляющей на суше деятельности (1995) Ответственное рыболовство ФАО (1995) Соглашение ООН о рыбных запасах (2001) Барбадосская программа действий для малых островных развивающихся государств (1994) Региональные морские конвенции и программы

## Продолжение таблицы 1

№	Цель	Текущее состояние	Международные соглашения
2	Уменьшить связанные водой опасности для здоровья человека	Расширение доступа к системам улучшенного водоснабжения и канализации снизило связанные с водой опасности для здоровья человека во всём мире, и были заметные успехи в сокращении некоторых связанных с водой болезней, тем не менее, 3,5 млн. человек всё ещё умирают каждый год от связанных с водой болезней.; частота паралитического отравления моллюсками увеличилась в пять раз с 1970 г.	Йоханнесбургский план выполнения решений (2002), Цели в области устойчивого развития (2015) Декларация тысячелетия ООН (2000) Лондонская конвенция по предотвращению загрязнения морской среды (1972) Международная конвенция по предотвращению загрязнения вод МАРПОЛ (1973) Международная конвенция о водных путях (1997) Конвенция по управлению балластными водами (2004) Глобальная проблема действий по защите морской среды от осуществляемой на суше деятельности (1995) Барбадосская программа действий для малых островных развивающихся государств (1994) Региональные морские конвенции и программы Многосторонние соглашения о пресной воде
3	Смягчить и адаптировать водную среду к неблагоприятным последствиям изменения климата	Инструменты широкой адаптации, подходы на основе сценариев и адаптивное управление формулируются в различных масштабах; запланированные мероприятия в водном секторе можно также найти в национальных программах действий по адаптации (НПДА) наименее развитых стран, 35% водных проектов Всемирного банка включали меры смягчения и адаптации к изменению климата Расходы, связанные с адаптацией к изменению климата являются дополнительными к тем, что необходимы для удовлетворения текущих задач по водоснабжению и санитарии, которые сами по себе недостаточно финансируются	Йоханнесбургский план выполнения решений (2002), Конвенция по биоразнообразию (1992) Рамочная конвенция ООН по изменению климата (1992) Барбадосская программа действий для малых островных развивающихся государств (1994) Многосторонние соглашения о пресной воде
4	Снижение и контроль загрязнения пресной воды	Нет доступных глобальных баз данных по качеству пресной воды для оценки общих тенденций; были некоторые местные улучшения качества воды, но кишечная палочка, по крайней мере, в части самых крупных речных систем, превышает стандарты ВОЗ для питьевой воды; валовая продуктивность водорослей и макрофитов в озёрах глобально увеличилась на 74%	Йоханнесбургский план выполнения решений (2002), Цели в области устойчивого развития (2015) Декларация тысячелетия ООН (2000) Конвенция по биоразнообразию (1992) Рамсарская конвенция по водно-болотным угодьям (1972) Международная конвенция о водных путях (1997) Глобальная программа действий по защите морской среды от осуществляемой на суше деятельности (1995) Барбадосская программа действий для малых островных развивающихся государств (1994) Принципы Дублина по воде и устойчивому развитию (1992)

## Продолжение таблицы 1

№	Цель	Текущее состояние	Международные соглашения
4	Снижение и контроль загрязнения морской воды	<p>По крайней мере, 415 прибрежных районов с тяжёлой эвтрофикацией. Глобальные стоки питательных веществ увеличились примерно на 15% с 1970 г.</p> <p>Нет статистически значимых изменений в количестве прибрежного или морского мусора, хотя данные недостаточны для многих регионов</p> <p>Сокращение многих загрязняющих веществ в тканях рыб; известные недавние загрязнения включают ядерный кризис в Фукусиме и разлив нефти на платформе в Мексиканском заливе</p>	Йоханнесбургский план выполнения решений (2002), Конвенция ООН по морскому праву (1982) Лондонская конвенция по предотвращению загрязнения морской среды (1972) Международная конвенция по предотвращению загрязнения вод МАРПОЛ (1973) Конвенция по биоразнообразию (1992) Рамсарская конвенция по водно-болотным угодьям (1972) Конвенция по управлению балластными водами (2004) Глобальная проблема действий по защите морской среды от осуществляемой на суше деятельности (1995) Соглашение ООН о рыбных запасах (2001) Барбадосская программа действий для малых островных развивающихся государств (1994) Региональные морские конвенции и программы
5	Расширение санитарных мероприятий, в том числе сбор сточных вод, переработки и утилизации	<p>Население планеты, имеющее доступ к объектам с улучшенным санитарным состоянием увеличилось до 64 % к настоящему моменту, хотя улучшения не затронули самых бедных и большинство сельских общин; более 2,4 млрд. человек (каждый третий) оставались так и не имеют возможность удалять отходы жизнедеятельности в канализацию.</p>	Йоханнесбургский план выполнения решений (2002), Цели в области устойчивого развития (2015) Международная конвенция о водных путях (1997) Принципы Дублина по воде и устойчивому развитию (1992) Многосторонние соглашения о пресной воде
6	Разработка и внедрение нормативно-правовой базы и правил	<p>Конвенция ООН по морскому праву ратифицирована 160 странами и Глобальная программа действий (ГПД) принята 108 странами; правовые базы для сброса промышленных и бытовых сточных вод существуют в большинстве развитых стран. Нормативы для неточечных источников находятся в разработке. Управление районами за пределами национальных границ слабое и раздробленное.</p>	Йоханнесбургский план выполнения решений (2002), Декларация тысячелетия ООН (2000) Конвенция ООН по морскому праву (1982) Лондонская конвенция по предотвращению загрязнения морской среды (1972) Международная конвенция по предотвращению загрязнения вод МАРПОЛ (1973) Конвенция по биоразнообразию (1992) Рамочная конвенция ООН по изменению климата (1992) Глобальная проблема действий по защите морской среды от осуществляемой на суше деятельности (1995) Ответственное рыболовство ФАО (1995) Соглашение ООН о рыбных запасах (2001) Барбадосская программа действий для малых островных развивающихся государств (1994) Принципы Дублина по воде и устойчивому развитию (1992) Многосторонние соглашения о пресной воде

## Продолжение таблицы 1

№	Цель	Текущее состояние	Международные соглашения
7	Укрепление институциональных координационных механизмов	Две трети проектов в трансграничных водных ресурсах являются результатом сотрудничества, хотя количество водных конфликтов увеличилось с 1970 г.; 295 международных соглашений по воде были подписаны с 1948 г.; менее 20% из 106 бассейнов с водными учреждениями имеют действующие многосторонние соглашения; 143 страны участвуют в 18 региональных морских программах.	Йоханнесбургский план выполнения решений (2002), Декларация тысячелетия ООН (2000) Лондонская конвенция по предотвращению загрязнения морской среды (1972) Международная конвенция по предотвращению загрязнения вод МАРПОЛ (1973) Конвенция по биоразнообразию (1992) Международная конвенция о водных путях (1997) Рамочная конвенция ООН по изменению климата (1992) Конвенция по управлению балластными водами (2004) Глобальная проблема действий по защите морской среды от осуществляющей на суше деятельности (1995) Ответственное рыболовство ФАО (1995) Соглашение ООН о рыбных запасах (2001) Барбадосская программа действий для малых островных развивающихся государств (1994) Региональные морские конвенции и программы Многосторонние соглашения о пресной воде
8	Разработка комплексных стратегий управления и планов, и их реализация	Более широкое признание необходимости комплексного подхода к управлению пресноводными и морскими системами; около половины стран добились значительного прогресса в разработке и реализации комплексного подхода к управлению водными ресурсами и повышения эффективности использования воды, но цель Йоханнесбургского плана выполнения решений 2002 г. далека от достижения; её реализация замедляется финансовыми, юридическими барьерами и/или нехваткой потенциала; недостаточно данных для оценки долгосрочной эффективности комплексного управления водными ресурсами	Йоханнесбургский план выполнения решений (2002), Цели в области устойчивого развития (2015) Декларация тысячелетия ООН (2000) Конвенция ООН по морскому праву (1982) Лондонская конвенция по предотвращению загрязнения морской среды (1972) Международная конвенция по предотвращению загрязнения вод МАРПОЛ (1973) Конвенция по биоразнообразию (1992) Рамсарская конвенция по водно-болотным угодьям (1972) Международная конвенция о водных путях (1997) Рамочная конвенция ООН по изменению климата (1992) Конвенция по управлению балластными водами (2004) Глобальная проблема действий по защите морской среды от осуществляющей на суше деятельности (1995) Ответственное рыболовство ФАО (1995) Соглашение ООН о рыбных запасах (2001) Барбадосская программа действий для малых островных развивающихся государств (1994) Принципы Дублина по воде и устойчивому развитию (1992) Региональные морские конвенции и программы Многосторонние соглашения о пресной воде

## Продолжение таблицы 1

№	Цель	Текущее состояние	Международные соглашения
9	Разработка адекватных систем мониторинга (национальных, региональных и глобальных)	Данные носят фрагментарный характер, не хватает полного глобального охвата или не регулярно обновляются; объёмы мониторинга морских акваторий и сбор данных дистанционного зондирования выросли, но глобальный мониторинг пресной воды снизился и в настоящее время недостаточен, моделирование и дистанционное зондирование дополняют мониторинг во многих случаях.	Йоханнесбургский план выполнения решений (2002), Конвенция ООН по морскому праву (1982) Лондонская конвенция по предотвращению загрязнения морской среды (1972 г) Международная конвенция по предотвращению загрязнения вод МАРПОЛ (1973) Конвенция по биоразнообразию (1992) Международная конвенция о водных путях (1997) Рамочная конвенция ООН по изменению климата (1992) Глобальная проблема действий по защите морской среды от осуществляемой на суше деятельности (1995) Соглашение ООН о рыбных запасах (2001) Барбадосская программа действий для малых островных развивающихся государств (1994) Региональные морские конвенции и программы Многосторонние соглашения о пресной воде

Таблица 1 показывает, что большинство международных программ по охране морских и пресноводных экосистем было разработано достаточно давно, а за последние 10 лет не разработана ни одна программа. Вероятно, это объясняется как незавершённостью принятых ранее программ, так и конфронтационной политикой западных элит, нацеленной на прекращение международного сотрудничества. Также приходится констатировать, что ряд международных экологических организаций, например, Greenpeace и WWF, превратились в инструменты нечестной конкурентной борьбы глобального Запада за свои корыстные интересы. Разумеется, разработка и проведение мероприятий по улучшению экологического состояния водных объектов России и прилегающих акваторий Мирового океана необходимы не для получения одобрения международных организаций, а для обеспечения достойных условий жизни многонационального народа России.

В Евразии основными факторами, влияющими на морские и пресноводные экосистемы, являются:

- 1) Сточные воды
- 2) Изменение климата
- 3) Биогенная нагрузка с водосборов (Патин, 2015)

В Западной Европе более 90% населения проживает в домах с подключением к централизованной системе канализации, оснащенной очистными сооружениями. Лишь около 1—2% хозяйствственно-бытовых стоков не проходит очистку и сбрасывается в окружающую среду без обработки (Всемирная организация здравоохранения, 2025).

Для сравнения, в Юго-Восточной Европе только 13% населения проживает в домах с подключением к системе канализации, оснащенной очистными сооружениями. В Юго-Восточной Европе 43% хозяйствственно-бытовых стоков сбрасывается в открытые водоемы без предварительной очистки. В странах Восточной Европы и Кавказа лишь 7% объема сточных вод проходит очистку (Всемирная организация здравоохранения, 2025).

В Российской Федерации наблюдается тенденция снижения объемов сбора и очистки сточных вод по причине отсутствия надлежащей инфраструктуры. Несмотря на то, что большой объем сточных вод собирается в коллекторы, только малая часть хозяйствственно-бытовых стоков поступает на очистные сооружения (UNEP. GEO-6, 2016).

Также в Европе актуальна проблема загрязнения вод органическими веществами. Основным источником органических веществ в реках являются хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды, а также отходы животноводства, сбрасываемые в пресноводные водоемы без надлежащей очистки (Европейское агентство по охране окружающей среды, 2020).

Температура воды представляет собой еще один фактор, воздействующий на химические, биохимические и биологические процессы в водных экосистемах и физические свойства водных объектов. Повышение температуры воды в сочетании с поступлением соединений фосфора антропогенного происхождения способствует увеличению биомассы цианобактерий и возникновению зон с низкой концентрацией и даже отсутствием кислорода. Температура воды в крупных европейских реках выросла за последние сто лет

на 1—3°C. При этом отмечена общая тенденция повышения температуры воды в реках и озерах Европы на 0,05—0,8 °C за десятилетие (UNEP. GEO-5, 2012).

В Европе за 1990-2010-е гг. наблюдалось снижение концентраций соединений азота и фосфора в природных водах. В целом, средние уровни концентраций фосфатов и нитратов в реках снизились соответственно на 57 и 20 % (UNEP. GEO-6, 2016). Вероятно, снижение концентраций этих биогенных элементов вызвано сокращением сбросов неочищенных сточных вод и снижением использования удобрений в сельском хозяйстве.

В большинстве европейских водотоков концентрация нитратов не превышает 50 миллиграмм на литр. Такой уровень содержания нитратов в водотоках достигнут благодаря усилиям по сокращению поступления соединений азота в водные объекты. Несмотря на достигнутый прогресс снижения содержания нитратов в реках, их уровень концентрации по-прежнему достаточно высок, чтобы вызывать эвтрофикацию прибрежных морских акваторий в местах впадения рек. При этом экологическое состояние многих рек и озер стран Европейского союза неудовлетворительно.

Несмотря на общее снижение уровня применения азотных удобрений в сельском хозяйстве, в отдельных странах этот уровень по-прежнему высок. Главной причиной загрязнения водных объектов в 90% случаев служит сельское хозяйство (UNEP. GEO-6, 2016).

Фосфор является важным питательным элементом для первичного биосинтеза, но повышенные уровни содержания фосфора в воде приводят к эвтрофикации. Суммарный модуль стока фосфора, переносимого водными потоками в озера и водохранилища Европы, варьируется от 2 до 10 кг на квадратный километр водосборной площади за год. Значительная фосфорная нагрузка за счёт антропогенных сбросов была выявлена в Куйбышевском водохранилище (83%) и Чудско-Псковском озере (60%). Основными источниками загрязнений являются хозяйственно-бытовые сточные воды, удобрения и отходы животноводства (навоз). Доля фосфорной нагрузки

бытового происхождения особенно высока в Онежском озере. Здесь доля удобрений составляет более 50% от общего объёма поступления. Однако ситуация меняется с течением времени. За последние годы концентрации фосфора значительно снизились. Например, в Восточной Европе после раз渲ала Советского Союза существенно сократилось использование удобрений. На снижение концентраций фосфатов также повлияли меры по очистке сточных вод (UNEP. GEO-6, 2016).

Как уже отмечалось выше, загрязнение пресноводных экосистем влияет на морские экосистемы. Многие морские экосистемы Европы уязвимы перед экологическими, экономическими и социальными факторами.

Изменение климата оказывает особенно выраженное воздействие на морские экосистемы. Изменение климата влияет на постоянное или временное затопление прибрежных зон и низменных участков, эрозию почв (Европейское агентство по охране окружающей среды, 2022). Повышение средней температуры приводит к таянию ледников, которое вызывает повышение уровня мирового океана. В последнее время возрастает частота стихийных бедствий (такие как ураганы и наводнения). Принято это связывать с изменением климата. Ураганы и наводнения вызывают временное повышение уровня мирового океана.

Изменение климата и снижение биоразнообразия являются серьезными факторами, обуславливающими изменения в европейских морских экосистемах. Около 30% антропогенных выбросов углекислого газа поглощается Мировым океаном, что приводит к подкислению морской воды (Feely et al., 2009). Ацидификация океана представляет собой источник значительного риска для морских экосистем. Например, она оказывает воздействие на первичную продукцию некоторых видов фитопланктона. Это может привести к смене доминантов и повышению биомассы сине-зелёных водорослей (цианобактерий) (Feely et al., 2009). Потепление морской воды может иметь ряд последствий для европейских морей, включая снижение

концентрации растворённого кислорода. Потепление влияет на пищевые цепи и сдвиг сроков этапов внутригодового цикла функционирования водных экосистем, способствует распространению теплолюбивых инвазивных видов (Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2023).

Биоразнообразие всех прибрежных акваторий Европы находится под угрозой. По этой причине создание и расширение морских заповедных зон (МЗЗ) может выступать ключевой природоохранной мерой для защиты биоразнообразия и морских экосистем в региональном и глобальном масштабах (Andersen et al., 2015).

Загрязнение европейских морей токсическими антропогенными веществами в целом снизилось. Но биогенная нагрузка остается высокой. Растёт негативное влияние загрязнения пластиковыми отходами (Европейское агентство по охране окружающей среды, 2024).

Эвтрофикация из-за поступления азотных и фосфорных удобрений продолжает оставаться одной из основных экологических проблем европейских морей (Helcom, 2007). Эта проблема стоит особенно остро для полузакрытых морских акваторий с низкой интенсивностью водообмена с Мировым океаном, таких, как Балтийское и Чёрное моря, а также закрытого Каспийского моря. В северо-восточной части Атлантического океана и в Северном море также есть акватории с высокой степенью антропогенной эвтрофикации (UNEP. GEO-6, 2016). Эвтрофикация в сочетании с другими антропогенными и экологическими факторами стресса может приводить к значительным изменениям структуры морских экосистем.

В конце 20-го – начале 21-го веков за 20 лет общий приток азота в европейские прибрежные воды сократился на 9%, а общая фосфорная нагрузка снизилась приблизительно на 15% (Helcom, 2007). Тем не менее сохраняются значительные региональные различия темпов снижения биогенной нагрузки. Снижение поступления фосфора из точечных источников более существенно,

чем поступление азота из рассредоточенных площадных источников, включая поступление из атмосферы (UNEP. GEO-6, 2016).

Оценки Хельсинской комиссии (ХЕЛКОМ) показали, что, несмотря на снижение общих объёмов поступления фосфора и азота, не только прибрежные районы, но и открытые части Балтийского моря испытывают сильное воздействие антропогенной эвтрофикации. Эти оценки также свидетельствуют о необходимости дальнейшего сокращения поступления в Балтийское море соединений азота и фосфора. Выявлена существенная разница по времени между фактическим сокращением поступления биогенных элементов и снижением эвтрофирования. От антропогенной эвтрофикации также страдает ряд прибрежных районов Северо-Восточной Атлантики, включая обширные акватории вдоль восточного побережья Северного моря, более локализованные зоны вдоль берегов Франции, Норвегии и Швеции, а также ряд европейских лиманов (Helcom, 2007).

## ГЛАВА 2. ПРОЦЕСС УРБАНИЗАЦИИ В XX И XXI ВЕКАХ

Человечество на протяжении своей многовековой истории постоянно взаимодействует с природной средой. Для развития человечеству требуется больше ресурсов. Возрастает нагрузка на природную среду. Охота и собирательство приводила к истощению природных ресурсов и истреблению видов диких животных. Около 12 тысяч лет назад люди начали переходить к оседлому образу жизни (Кубарев, 2017). Раньше всего это произошло на Ближнем Востоке. В связи с более комфортными условиями жизни стала увеличиваться и численность населения. С переходом к оседлому образу жизни появилась антропогенная нагрузка на водные экосистемы из-за увеличения стока частиц почвы, содержащих соединения азота и фосфора. Отходы жизнедеятельности людей и скота также попадали в расположенные вблизи водные объекты и активизировали в них процессы эвтрофикации. Примерно в 5-ом тысячелетии до н.э. стали появляться города, которые становились не только важными культурными и экономическими центрами, но и крупными источниками загрязнения (Боков и Буряк, 2013). В связи с индустриализацией и научно-технической революцией усилилась роль городов и антропогенная нагрузка на водные экосистемы. Как ответ на ухудшающееся качество водных объектов, первые очистные сооружения стали появляться только в середине XIX века (Butler and Davies, 2011).

Активизация урбанизации была связана с индустриализацией, начавшейся в XVIII веке, и научно-технической революцией XX века. К концу первой четверти XXI века доля городского населения в мире превысила 56 %, и она может к 2030 году возрасти до 60 % (ООН, 2025). Отдел народонаселения ООН прогнозирует, что за первую половину XXI века численность городского населения в мире увеличится более чем на 3 млрд. человек. На развивающиеся страны придётся наибольший прирост. К 2050 году более 70% населения Китая и 50% в Индии, вероятно, будет городским. Ожидается, что в Китае появится ещё 30 городов с населением более 1 млн. жителей и 26 таких же городов в

Индии (ООН, 2025). Отмечается, что темпы урбанизации в мире неравномерны (UNEP. GEO-5, 2012).

В Европе более 75 % населения проживает в городах. Распределение городского населения неравномерно. Западная часть Европы в большей степени урбанизирована, чем восточная. Прогнозируется увеличение доли городского населения к 2030 году до 80 % (ООН, 2025). В России доля городского населения составляет около 75 % (Федеральная служба государственной статистики - Росстат, 2025). Вместе с численностью городского населения увеличивается площадь городов и возрастает антропогенная нагрузка на окружающую среду.

Урбанизация увеличивает эксплуатационную нагрузку на инфраструктуру городов – в частности, на жилищно-строительный комплекс, зелёные насаждения, системы электро-, водоснабжения, канализации и очистки стоков и выбросов. Рост городских агломераций может негативно повлиять на качество жизни горожан. Несмотря на то, что города являются центрами инноваций и создания материальных благ, они также являются источниками интенсивного загрязнения окружающей среды и других неблагоприятных экологических воздействий, включая шум и создание городских островов тепла.

Урбанизация требует комплексного управления охраной здоровья и защитой окружающей среды для создания достойных условий проживания и снижения вредных воздействий.

Основные проблемы, возникающие вследствие урбанизации:

- 1) Снижение физической активности горожан.
- 2) Недостаток озеленения.
- 3) Уменьшение естественных ареалов видов животных и растений.
- 4) Загрязнение атмосферы, включая локализованные выбросы парниковых газов в атмосферу.
- 5) Загрязнение поверхностных и подземных вод.

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). Такая особенность размещения населения 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. Вблизи Балтийского моря расположено много крупных городских агломераций, сформировавшихся вокруг морских портов. Ряд таких городов являются столицами (Копенгаген, Стокгольм, Хельсинки, Рига, Таллинн). Темпы роста численности населения на побережье Балтийского моря превышают аналогичный показатель для удаленных от Балтийского моря территорий. Например, с 1959 по настоящий момент удельный вес прибалтийских регионов РФ в общей численности населения страны вырос с 4,4 % до 5,5 % (Росстат, 2025). В таких прибалтийских странах, как Швеция, Дания, Финляндия, Латвия, Эстония плотность населения приморских регионов превышает аналогичный показатель для внутренних регионов в 5 раз (Федоров и др., 2017).

В странах Балтийского региона доля городского населения выше, чем среднемировая. Для некоторых стран доля городского населения выше среднеевропейской (табл. 2.1). Такие особенности распределения городского населения приводят к повышенной антропогенной нагрузке на экосистемы Балтийского моря.

Санкт-Петербург – самый крупный мегаполис на побережье Балтийского моря. Город на протяжении всей своей более чем трехсотлетней истории активно развивается (рис. 2.1). Площадь и численность населения выросла в десятки раз. Это приводит к увеличению антропогенной нагрузки на природные

компоненты. Санкт-Петербург имеет обширную гидрографическую сеть, поэтому его водные объекты особенно подвержены загрязнению.

Таблица 2.1. Доля городского населения стран Балтийского региона

Страна	Доля городского населения, %	Источник
Швеция	85	Правительство Швеции
Финляндия	70	Правительство Финляндии
Россия	75	Федеральная служба государственной статистики РФ
Эстония	70	Статистическая служба Эстонии
Латвия	68	Правительство Латвии
Литва	68	Статистическая служба Литвы
Польша	61	Правительство Польши
Германия	81	Правительство Германии
Дания	88	ООН

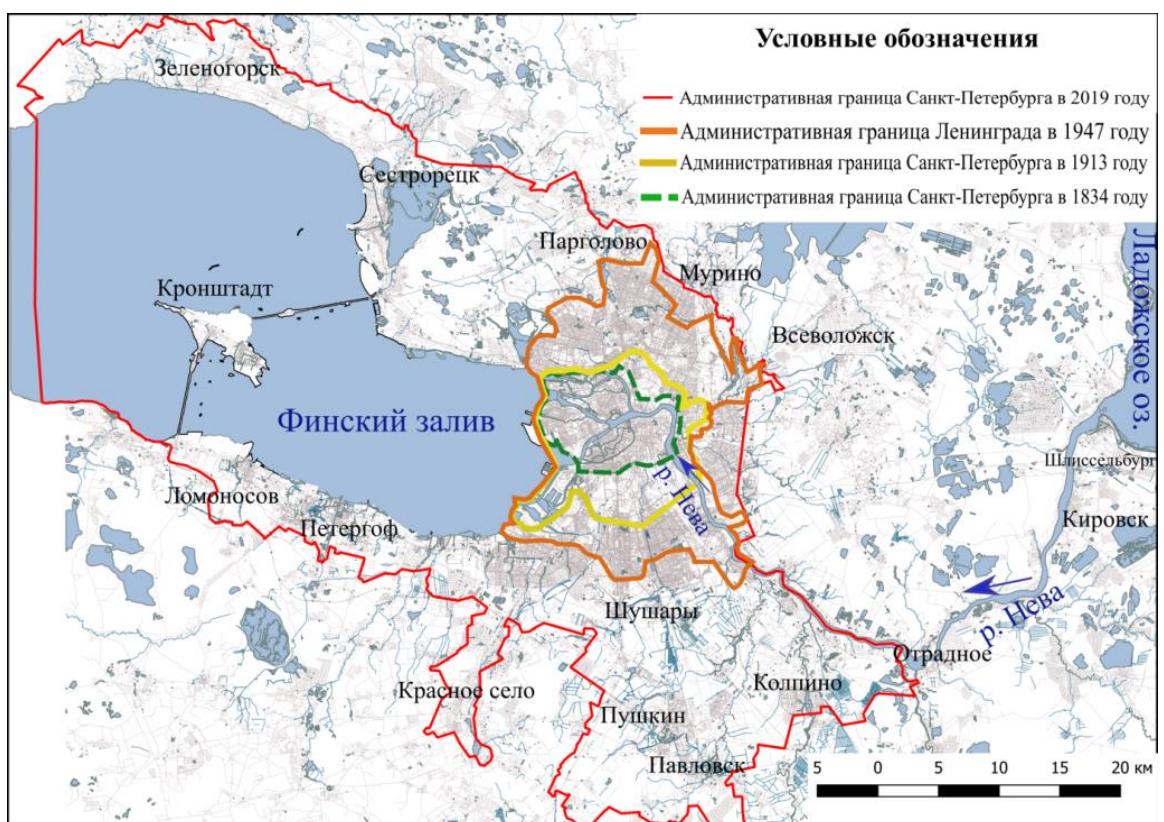


Рисунок 2.1. Динамика границ Санкт-Петербурга в XIX-XXI веках

## ГЛАВА 3. ИСТОЧНИКИ И ПУТИ ПОСТУПЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА И ФОСФОРА В ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ С УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ.

В нашей стране уделяется большое внимание сохранению водных экосистем – как национального достояния (Водный кодекс, 2006). Площадь водных объектов в нашей стране составляет более 12 % от всей площади страны. Россия занимает второе место в мире по объему пресной воды (Федеральный проект «Вода России», 2025). Сохранение таких обширных водных ресурсов исключительно важная национальная задача. С 2025 года в России заработали новые национальные проекты. Реализация национальных проектов запланирована на 2025-2030 гг. Важность экологической повестки на самом высоком уровне подтверждает запуск в 2025 году национального проекта «Экологическое благополучие». Его планируется реализовать до 2030 года. Для РФ необходимость решения проблемы оценки экологического состояния и сохранения водных экосистем подтверждается тем, что среди федеральных проектов национального проекта «Экологическое благополучие», есть «Вода России» (Федеральный проект «Вода России», 2025). Федеральный проект «Вода России» включает мероприятия по снижению антропогенного воздействия на водные экосистемы и их сохранение для благополучия граждан нашей страны. Объективная, полная и научно-обоснованная оценка состояния природных и антропогенно-преобразованных систем поможет сформировать план действий по их охране и рациональному использованию. В «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утверждённой Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145» акцентируется систематизация знаний, практик разработки, экспертизы и реализации проектов, связанных с преобразованием и управлением водными объектами в связи с развитием цифровизации в науках о Земле, природе, обществе. В перечень «Приоритетных направлений научно-технологического развития» (Указ Президента Российской Федерации № 529 от 18 июня 2024 г.)

входит п. 7 «...сохранение и рациональное использование природных ресурсов», а в «Перечень важнейших наукоемких технологий Российской Федерации» вошли п. 19. «Мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды» и «технологии предупреждения и снижения рисков чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, негативных социально-экономических последствий» п. 21. «Технологии сохранения биологического разнообразия».

На международном уровне признана исключительная важность водных объектов и уделяется внимание решению проблемы их загрязнения. Отмечается, что одной из основных причин загрязнения водных объектов является нерациональное потребление водных ресурсов и производство. Вследствие чего происходит избыточное поступление отходов в окружающую среду. Снизить негативное воздействие на окружающую среду и гармонизировать отношения человечества с природой призваны цели в области устойчивого развития (Цели..., 2025). Их реализация запланирована в срок до 2030 года. Например, в цели № 12 «Обеспечение перехода к рациональным моделям потребления и производства» уделяется внимание рациональному использованию водных ресурсов. В частности отмечается, что человек загрязняет водные ресурсы быстрее, чем природа может очистить воду в реках и озерах. Согласно задаче 12.4 уже к 2020 году должно было быть достигнуто экологически рациональное использование химических веществ и всех отходов на протяжении всего их жизненного цикла и сокращено их попадание в воду. Это необходимо, чтобы свести к минимуму их негативное воздействие на здоровье людей и окружающую среду. Из-за пандемии коронавируса сроки достижения всех задач были смешены на более позднее время. Еще одна цель, достижение которой направлено на повышение гармонизации отношения человечества с водной средой – это «Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех» (Цель № 6). Отмечается, что более 80 % сточных вод, образующихся в результате деятельности

человека, сбрасываются в реки или моря без какой-либо очистки. При этом 2,4 миллиарда человек не имеют доступа к основным санитарным услугам, таким как туалеты или оборудованные выгребные ямы (UNEP. GEO-5, 2012). Для достижения этой цели устойчивого развития предлагается к 2030 году повысить качество поверхностных вод посредством уменьшения их загрязнения, ликвидации сбросов отходов и сведения к минимуму сбросов опасных химических веществ и материалов. Планируется сокращение вдвое доли неочищенных сточных вод и значительное увеличение масштабов безопасного повторного использования сточных вод во всем мире.

Концепция устойчивого развития, цели развития тысячелетия (2000 г.) и цели в области устойчивого развития (2015 г.) вызывают дискуссии в России и других странах с момента их принятия. У документов есть свои достоинства и недостатки. В целом, мировое сообщество признает, что концепция и цели в полном объеме недостижимы человечеством без значительного снижения объемов потребления ресурсов и как следствие ухудшения условий жизни людей. Об этом подробно описано в учебном пособии Г.Т. Фрумина «Геоэкология: реальность, наукообразные мифы, ошибки, заблуждения» (Фрумин, 2006). Однако, Цели развития являются ориентиром для развития человечества в гармонии с природной средой. Идеи устойчивого развитияозвучны с положениями учения о ноосфере В.И. Вернадского. Формирование целостной ноосферы – как оболочки планеты недостижимо в полном объеме, так и цели в области устойчивого развития полностью не могут быть достигнуты. Однако, некоторые элементы ноосферы уже достигнуты, как и цели в области устойчивого развития. Ключевым элементом человеческой жизни является планирование и целеполагание. Без этих компонентов невозможно развитие. Поэтому и к целям в области устойчивого развития, на мой взгляд, стоит относиться как к направлению стрелки компаса. Это не более чем вектор развития, но без него верный путь недостижим.

Отмечается, что сточные воды являются одним из основных источников поступления соединений азота и фосфора в водные объекты в мире. Помимо сточных вод, большая доля соединений азота и фосфора поступает с поверхностным стоком и атмосферными выпадениями. Как уже отмечалось выше, избыточное поступление азота и фосфора в водные объекты приводит к их эвтрофированию.

Несмотря на успехи в целом в сфере очистки сточных вод, человечество достигло гораздо меньших успехов в сокращении поступления биогенных элементов из диффузных источников. Основными такими источниками считаются стоки атмосферных осадков с сельскохозяйственных и городских территорий в пресноводные и морские экосистемы. Поверхностный сток с сельскохозяйственных территорий может приводить к загрязнению водных объектов нитратами. Органические соединения азота и фосфора попадают в водные объекты из органических удобрений и навоза. Также озабоченность вызывает поступление пестицидов со стоками с территорий сельскохозяйственного назначения.

Отмечено, что глобальный перенос азота и фосфора реками увеличился примерно на 15 % по сравнению с 1970 г, при этом на Южную Азию приходится не менее половины прироста. В озёрах с 1970 г. произошло увеличение на 74% продуктивности фитопланктона и макрофитов. С 1990 года произошло резкое увеличение числа прибрежных акваторий, подверженных эвтрофикации. Это число достигло 169. Особенno распространены такие зоны в морях Юго-Восточной Азии, Европы и восточной части Северной Америки. По прогнозам азотная нагрузка должна еще вырасти на 5% к 2030 году, в основном в Южной Азии (UNEP. GEO-5, 2012).

К загрязнению водных экосистем приводят как природные процессы, так и антропогенная деятельность. Деятельность человека связана с ростом народонаселения, увеличением доли городского населения, ростом производства сельскохозяйственной продукции. Эти факторы приводят к

загрязнению водных экосистем из-за поступления в них хозяйственно-бытовых и промышленных отходов. Биогенные элементы (азот и фосфор) поступают в водные объекты из точечных (хозяйственно-бытовые и промышленные выпуски) и неточечных источников (рассеянный поверхностный сток с городских и сельскохозяйственных угодий) (UNEP, 2019).

Регулирование промышленных точечных источников загрязнения воды развито в России, странах СНГ и Европейского союза. Всё большее внимание уделяется неточечным источникам, таким как стоки с сельскохозяйственных предприятий. Их труднее регулировать, и они могут приводить к нитратному загрязнению водных объектов. В дополнение к усилиям по сокращению стоков органических загрязняющих веществ из удобрений и навоза, необходим контроль поступления органофосфатов из пестицидов.

В Европе большое внимание уделяется проблеме поступления сточных вод в водные объекты. В среднем, в Западной и Центральной Европе ежегодно производится примерно 50 млрд. кубических метров сточных вод в год (UNEP, 2019). С 2000 года по 2019 г. этот объем снизился на 11 %. Это привело к улучшению качества воды во многих европейских реках с момента принятия в 2000 году Водной рамочной директивы ЕС (UNEP, 2019). Успехи в сокращении объемов сточных вод отмечаются только для Западной и Центральной Европы. Качество воды во многих реках и озерах Латинской Америки, Африки, Азии и Тихого океана в последние годы снизилось (Фонд Международного комитета по озёрной среде; UNEP, 2019)

Около половины вод США не соответствуют стандартам защиты водной жизни, причём более 40% не соответствуют стандартам рекреационного использования (UNEP, 2019).

Существуют различия в отношении сбора и переработки сточных вод в разных частях Европы. В Западной Европе до 99 % всех хозяйствственно-бытовых сточных вод проходит очистку (UNEP, GEO-6, 2016). Например, по состоянию на 2024 год, в таких европейских странах как Нидерланды, Германия,

Швейцария и Дания очищается до нормативных показателей более 99 % хозяйственно-бытовых сточных вод (Европейская экономическая комиссия ООН, 2025)

Среди европейских стран с наиболее низкой долей очистки сточных вод до нормативных показателей стоит отметить: Северную Македонию (около 5 %); Албанию (около 13 %); Румынию и Черногорию (в обеих странах около 31 %); Сербию и Хорватию (в обеих странах около 34 %) (Европейская экономическая комиссия ООН, 2025).

Среди стран бывшего СССР наибольший уровень очистки сточных вод достигнут в Латвии, Литве и Эстонии (более 90 % бытовых сточных вод очищается до нормативных показателей), потом следует Беларусь (более 83 %), Молдова и Азербайджан (в обеих странах около 40 %), Узбекистан и Казахстан (в обеих странах около 30 %), Кыргызстан (около 20 %) (Европейская экономическая комиссия ООН, 2025). В нашей стране, по данным Росстата, в 2024 году более 77 % домохозяйств имеют возможность удалять сточные воды в централизованную канализацию (Росстат, 2025) и около 24,4 % сточных вод очищается до нормативных показателей (Государственная статистика, 2025). По данным Европейской экономической комиссии ООН, аналогичный показатель в нашей стране составляет 21,4 % (Европейская экономическая комиссия ООН, 2025).

В целом, в мире около 2,4 млрд. человек не имеют доступа к централизованной канализации. Есть различия между городским и сельским населением по уровню подключения к централизованной канализации. В мире около 82 % городского и лишь около 51 % сельского населения имеют доступ к канализации (WHO и UNICEF, 2025 г.).

Индикатором поступления неочищенных хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод, а также отходов животноводства, сбрасываемых в пресноводные водные объекты без надлежащей очистки, является показатель биохимического потребления кислорода (БПК). С 1992 г. этот показатель в

европейских реках только снижался, наглядно отражая улучшения в очистке сточных вод. Наиболее высокие значения БПК были зарегистрированы в Центральной и Юго-Восточной Европе, где очистка сточных вод отстает от стран Западной Европы. Высокие уровни БПК наблюдаются в реках вниз по течению от больших городов, где они вызваны сбросом хозяйствственно-бытовых и промышленных сточных вод, обычно содержащих большие объемы органических веществ. Увеличение значений БПК в водотоках является наглядным результатом низкой эффективности работы очистных сооружений (UNEP, GEO-6, 2016).

В Европейских странах большое внимание уделяется мониторингу содержания форм азота и фосфора в водных объектах. Отмечается, что поверхностный сток оказывает серьезную нагрузку на водные объекты (UNEP, GEO-6, 2012).

Одной из крупнейших рек Европы является река Дунай. С водосборного бассейна в реку поступает азот и фосфор от разных источников. Основным источником является диффузное загрязнение, в первую очередь, с сельскохозяйственных угодий (84 % общего азота и 67 % общего фосфора от всех источников). С городскими сточными водами поступает около 18 % азота и фосфора. Следует подчеркнуть, что на общее поступление из точечных источников значительно влияет сброс неочищенных сточных вод и сбросы средних и крупных городских агломераций, не прошедшие очистку от биогенных элементов (UNEP, 2019).

Несмотря на общее улучшение качества поверхностных вод стран Европейского союза (средние уровни содержания фосфатов и нитратов с 1992 г. снизились соответственно на 57% и 20% (UNEP, 2019), состояние многих из водных объектов всё ещё не отвечают экологическим целям Европейской рамочной водной директивы (European Union, 2000).

Азот и фосфор со стоком рек поступает в морские экосистемы. Рост выноса соединений азота и фосфора с 1970 почти удвоился (UNEP, 2019). В

Мексиканском заливе существует «мёртвая зона», обычно охватывающая почти 13800 км<sup>2</sup>, обусловленная выносом соединений азота с зерновых полей Среднего Запада США, и их дальнейшим переносом по реке Миссисипи. Соединения азота стимулируют развитие одноклеточных водорослей, а их дальнейшее разложение приводит к поглощению растворенного в воде кислорода, что удушаёт жизнь в морской среде. Сейчас в океанах почти в четыре раза больше мёртвых зон (400), чем в 1950 году, в том числе в Средиземном море (Pearce, 2018). Некоторые крупные городские агломерации в Азиатско-Тихоокеанском регионе испытывают проблемы из-за высокого содержания нитратов в подземных водах из-за их утечек из канализационных и септических резервуаров (Umezawa et al. 2009), а сельские районы во многих странах страдают от чрезмерного применения химических удобрений (Novotny et al. 2010).

### 3.1. Система очистки сточных вод Санкт-Петербурга

Обычно хозяйственно-бытовые стоки попадают в общеславную канализацию, где смешиваются с промышленными и поверхностными стоками. Реже встречаются раздельные системы канализации.

В Санкт-Петербурге существуют две централизованные системы водоотведения (ЦСВ) (Водоканал Санкт-Петербурга. 2024):

- 1) Комбинированная централизованная система водоотведения
- 2) Ливневая централизованная система водоотведения

В первую систему поступают сточные воды от самых разнообразных абонентов ГУП «Водоканал СПб» (более 5 миллионов) и поверхностный сток. В комбинированной централизованной системе водоотведения (ЦСВ) смешиваются сточные воды разных категорий и разного химического состава (бросы промышленных предприятий, хозяйственно-бытовые сточные воды, поверхностные сточные воды). Комбинированная ЦСВ охватывает около 70 % территории города. Система включает 14 канализационных очистных

сооружений. В настоящий момент доля очищаемых сточных вод, поступающих в комбинированную централизованную систему водоотведения, составляет около 99,7 % (Водоканал Санкт-Петербурга, 2024).

В ливневую централизованную систему водоотведения поступает только поверхностный сток с городской территории. В систему поступает поверхностный сток в основном из районов новостроек и пригородов. Насчитывается 7 очистных сооружений. К сожалению, доля очищаемых сточных вод, поступающих в ливневую централизованную систему водоотведения немного превышает 4 %.

Таким образом, наибольшие усилия необходимо сосредоточить на сбор и очистку поверхностного стока с территории Санкт-Петербурга. Но и задача по 100 % очистке сточных вод в комбинированной ЦСВ ещё не решена (Водоканал Санкт-Петербурга, 2024).

Очистка сточных вод в Ленинграде началась в 1979 году. До этого сточные воды одного из самых крупных городов СССР поступали в Неву и Финский залив без очистки. К 1985 году была полностью введена в эксплуатацию Центральная станция аэрация. Следом открылась Северная станция аэрации. К 2000 году очистку проходили 75 % сточных вод, поступающих в комбинированную ЦСВ. В 2005 году были открыты Юго-Западные очистные сооружения. Юго-Западные очистные сооружения были первыми, которые были построены с учётом рекомендаций Конвенции по защите морской среды района Балтийского моря (ХЕЛКОМ). Россия присоединилась к конвенции в 1998 году и взяла на себя обязательство принимать меры по предотвращению и ликвидации загрязнения Балтийского моря. Такие обязательства были приняты в первую очередь в интересах нашей страны. Для России Балтийское море – важнейшая акватория, имеющая уникальное рыбохозяйственное, транспортное, рекреационное значение. В конвенции ХЕЛКОМ отдельно выделяется задача по удалению фосфора из сточных вод. При строительстве очистных сооружений в XX веке уделялось

внимание только очистке сточных вод от взвешенных частиц и органических веществ. С начала нового тысячелетия, ориентируясь на передовой опыт и рекомендации ХЕЛКОМ, началась работа по очистке сточных вод от азота и фосфора. В 2004 году на Центральной и Северной станциях аэрации и канализационных очистных сооружениях г. Сестрорецка были внедрены технологии по очистке сточных вод от азота и фосфора. В 2005 году с использованием тех же передовых технологий были реконструированы канализационные очистные сооружения г. Пушкин (Водоканал Санкт-Петербурга, 2024).

Для сохранения экосистемы Балтийского моря с начала 2000-х годов ГУП «Водоканал СПб» реализуется «Программа прекращения сброса сточных вод без очистки в водные объекты г. Санкт-Петербурга». В программе большое внимание уделяется переключению в системы водоотведения прямых выпусков сточных вод в водные объекты. В ходе реализации программы уже переключено более 300 прямых выпусков неочищенных хозяйствственно-бытовых, общесплавных и дождевых сточных вод расходом более 500 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Для переключения прямых выпусков сточных вод были построены продолжения главного канализационного коллектора в Северной части города и Охтинский коллектор на востоке. Одним из последних мероприятий программы стало строительство напорной канализационной сети от канализационных очистных сооружений в пос. Металлострой до канализационной насосной станции (КНС) «Рыбацкая». Канализационные очистные сооружения в пос. Металлострой были введены в эксплуатацию в 1968 году, они технически устарели. Кроме того, в последнее время на сооружениях наблюдался дефицит мощности, что являлось основным фактором, сдерживающим развитие близлежащих территорий. Проведенные ГУП «Водоканал СПб» мероприятия существенно снизили нагрузку сточными водами на Неву. Предприятию для того, чтобы к 2030 году достигнуть уровня

100 % очистки сточных вод необходимо ликвидировать около 70 прямых выпусков сточных вод (Водоканал Санкт-Петербурга, 2024).

После 2030 года работы по развитию ливневой (дождевой) ЦСВ продолжатся, будут спроектированы и построены перехватывающие канализационные сети и очистные сооружения поверхностных сточных вод (Водоканал Санкт-Петербурга, 2024).

Предприятие отмечает, что для исключения поступления сточных вод без очистки в водные объекты необходимо сосредоточиться на том, чтобы:

- Прекратить складировать снег на территории города
- Обеспечить бесперебойную и надёжную эксплуатацию системы канализации.

ГУП «Водоканал СПб» отмечает и проблемы системы водоотведения Санкт-Петербурга (Водоканал Санкт-Петербурга, 2024):

- 1) Износ технологического оборудования и строительных конструкций сооружений.
- 2) Применяемые технологии не обеспечивают очистку сточных вод до уровня существующих требований к сбросу в водные объекты.
- 3) Низкая доля сбора и очистки поверхностных сточных вод.
- 4) Из общего объема очищенных сточных вод только 19 % перед сбросом подвергаются обеззараживанию УФ-излучением.

### 3.2. Сбросы хозяйственно-бытовых вод Санкт-Петербурга

Крупнейшими очистными сооружениями Санкт-Петербурга комбинированной централизованной системы водоотведения являются:

- Центральная станция аэрация
- Северная станция аэрации
- Юго-западные очистные сооружения

В комбинированной централизованной системе водоотведения хозяйственно-бытовые стоки смешиваются с другими сточными водами.

Очистные сооружения города позволяют очистить хозяйствственно-бытовые сточные воды в составе стоков комбинированной ЦСВ до норм, предусмотренных Helcom. В соответствии с нормами Helcom, концентрации общего азота и фосфора в очищенных сточных водах перед сбросом в водный объект не должны превышать 10 и 0,5 мг/л (Helcom, 2007).

На очистных сооружениях ведётся лабораторный контроль качества очищенных сточных вод. Результаты контроля за 2022 год представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Результаты контроля качества сточных вод после очистки (Водоканал Санкт-Петербурга, 2024)

Субстанция	Общее количество проб после очистных сооружений	Количество проб после очистных сооружений, не соответствующих нормативам	Доля проб, не соответствующая нормативам от общего количества проб
Аммоний-ион	393	106	27 %
Фосфор фосфатов	386	19	5 %

ГУП «Водоканал СПб» не приводит данных об анализе содержания общего азота и фосфора, но такие исследования должны проводиться в соответствии с соблюдением норм Helcom. Исходя из представленных в открытом доступе ГУП «Водоканал СПб» данных, в настоящее время невозможно выполнить очистку 100 % сточных вод до нормативных показателей.

Как уже отмечалось выше, более 99 % всех хозяйствственно-бытовых стоков поступают в канализационные коллекторы ГУП «Водоканал СПб» на основании договоров абонентского обслуживания. Двумя основными пунктами в договоре являются плата за объём принимаемых сточных вод и химический состав принимаемых в сети ГУП «Водоканал СПб» сточных вод. К сожалению, в открытом доступе не приводятся данные о концентрациях субстанций (например, общий азот и фосфор) в принимаемых сточных водах. Эти условия

указанны в договорах между абонентом и ГУП «Водоканал СПб». Об уровне содержания общего азота и фосфора в хозяйственно-бытовых сточных водах можно сделать вывод на основании данных о составе аналогичных сточных вод, поступающих в реку Охту. С начала 2021 года поступавшие в реку Охту хозяйственно-бытовые сточные воды переключены в канализационный коллектор. В таблице 3.2 приведены средние концентрации общего азота и фосфора в хозяйственно-бытовых сточных водах, поступавших в реку Охту без очистки в 2018 и 2019 гг.

Таблица 3.2. Средние концентрации общего азота и фосфора (мг/л) в хозяйственно-бытовых сточных водах, поступавших в реку Охту без очистки в 2018-2019 гг. (по данным ГУП «Водоканал СПб»)

год	2018	2019	Нормы Helcom
Общий азот	36,82	27,07	10,00
Общий фосфор	2,88	2,29	0,50

Как видно из таблицы 3.2, хозяйственно-бытовые сточные воды, поступавшие в реку Охту, до их переключения в Охтинский канализационный коллектор не соответствовали нормам HELCOM для сбрасываемых сточных вод в водные объекты и значительно превышали эти нормы. Поступление хозяйственно-бытовых сточных вод в водные объекты без очистки значительно увеличивает антропогенную нагрузку на водные экосистемы. Понимание недопустимости поступления хозяйственно-бытовых сточных вод без очистки в водные объекты Санкт-Петербурга есть и в ГУП «Водоканал СПб». Предприятие к 2030 году планирует очищать 100 % хозяйствственно-бытовых сточных вод Санкт-Петербурга.

### 3.3. Сбросы промышленных предприятий

В Санкт-Петербурге сточные воды промышленных предприятий на основании договоров абонентского обслуживания попадают в комбинированную централизованную систему водоотведения ГУП «Водоканал

СПб». К абонентам ГУП «Водоканал СПб» предъявляет требования по объемам сбрасываемых сточных вод и химическому составу принимаемых сточных вод. Абоненты в соответствии с условиями договора обязаны вносить плату за сброс сточных вод в канализацию. Сброс промышленных сточных вод в канализацию для предприятий удобнее и выгоднее, чем сброс в водные объекты. При соблюдении условий договора предприятию необходимо платить 46 рублей за кубический метр сточных вод (Водоканал Санкт-Петербурга, 2024). При сбросе сточных вод в природные водные объекты необходимо платить за негативное воздействие массы каждого сбрасываемого химического соединения, указанного в разрешительном документе. В случае превышения установленных показателей сброса в водный объект, плата исчисляется с повышающим коэффициентом. Ущерб водно-биологическим ресурсам в случае сброса сверхнормативных стоков оплачивается водопользователем. Оформить договорные отношения с ГУП «Водоканал СПб» проще, чем получить решение о предоставлении водного объекта в пользование для сброса сточных вод. Отчётность по сбросам сточных вод в водные объекты сложнее, чем аналогичная отчётность для ГУП «Водоканал СПб». Таким образом, для предприятия по экономическим и административным мотивам сбрасывать сточные воды в комбинированную ЦСВ ГУП «Водоканал СПб» выгоднее, чем в водные объекты города. Сбор сточных вод промышленных предприятий в комбинированную ЦСВ позволяет снизить антропогенную нагрузку на водные экосистемы.

Стоки промышленных предприятий, как правило, не содержат в большом количестве соединения азота и фосфора. Со сточными водами промышленных предприятий в большом количестве поступают тяжелые металлы, фенолы, синтетические поверхностно-активные вещества и другие ксенобиотики. Таким образом, промышленные сточные воды не являются основным источником поступления азота и фосфора, угрожающих Балтийскому морю эвтрофированием его экосистем.

### 3.4. Сбросы ливневой канализации

Ливневая канализация служит для сбора и отведения 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. Поверхностный сток в Санкт-Петербурге поступает в комбинированную централизованную систему водоотведения и ливневую централизованную систему водоотведения. В комбинированной ЦСВ поверхностный сток смешивается с промышленными и хозяйствственно-бытовыми сточными водами. Очистка поверхностных сточных вод, поступивших в комбинированную ЦСВ, происходит на очистных сооружениях вместе с другими сточными водами. В ливневую централизованную систему водоотведения поступает поверхностный сток в основном из районов новостроек и пригородов. Поверхностный сток в ливневой ЦСВ не смешивается с другими сточными водами и очищается на очистных сооружениях, работающих только с поверхностным стоком. К сожалению, очистных сооружений недостаточно, поэтому доля канализуемых очищаемых сточных вод поверхностного стока в ливневой ЦСВ составляет только немного более 4 %. Остальные сточные воды, представляющие собой поверхностный сток, поступают в водные объекты города без очистки. О химическом составе этих сточных вод можно судить по данным о поверхностных сточных водах, сбрасываемых в реку Охту (табл. 3.3).

Таблица 3.3. Средние концентрации общего азота и фосфора (мг/л) в поверхностном стоке ливневой канализации, поступавших в реку Охту без очистки в 2018-2019 гг. (по данным ГУП «Водоканал СПб»)

	2018	2019	Нормы Helcom
Общий азот	5,61	4,98	10,00
Общий фосфор	0,44	0,34	0,50

Таблица 3.3 показывает, что содержание общего азота и фосфора в поступающем в реку Охту без очистки поверхностном стоке в 2018-2019 гг. в среднем не превышало нормы Helcom. Концентрации общего азота и фосфора в сточных водах ливневой канализации без очистки значительно ниже, чем в хозяйствственно-бытовых сточных водах, поступающих в водные объекты без очистки (табл. 3.2). Но к 2030 году планируется исключить поступление хозяйствственно-бытовых сточных вод без очистки в водные объекты, а в отношении поверхностных сточных вод такие планы пока отсутствуют. 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.

### 3.5. Рассредоточенный площадной сток

Рассредоточенный площадной сток представляет собой атмосферные осадки, стекающие с водосборной площади напрямую в водные объекты без очистки.

Проблема оценки поступления токсических загрязняющих веществ и биогенных элементов с рассредоточенным поверхностным стоком изучена недостаточно в связи с объективными трудностями измерений и расчётов.

В статье ученых из Румынии (Radulescu D. et al., 2018) приводятся результаты сравнения собственных исследований по изучению концентраций токсических загрязняющих веществ и биогенных элементов в поверхностном стоке на территории Румынии с данными подобных исследований, выполненных в других странах (табл. 3.4).

Таблица 3.4. Усредненные концентрации ряда токсических загрязняющих веществ и биогенных элементов в поверхностном стоке с урбанизированных водосборов (Radulescu D. et al., 2018)

	США	ФРГ	Румыния	Франция	Дания	Финляндия	Малайзия	Китай	Иран
Общ. азот, мг/л	1,2-1,9	2,4	-	2,8	1,1	1,8	-	-	6,7
Общ. фосфор, мг/л	0,3-0,4	0,4	-	0,8	0,3	0,2	0,4-1,0	0,7	0,3
Свинец, мкг/л	6,0-140,0	118,0	1,0	27,0-133,0	6,0	11,4	190,0	-	278,0
Цинк, мкг/л	70,0-200,0	275,0	79,0	270,0-550,0	60,0	232,0	50,0	-	342,0
Медь, мкг/л	12,0-33,0	48,0	51,0	55,0-61,0	11,0	34,0	-	-	-

Эти величины можно сравнить со среднегодовыми концентрациями ряда загрязняющих веществ и соединений биогенных элементов в поверхностном стоке, поступившем в реку Охту в 2017-2019 гг. по данным ГУП «Водоканал СПб» (табл. 3.5).

Таблица 3.5. Среднегодовые концентрации ряда загрязняющих веществ, общего азота и фосфора в поверхностном стоке, поступившем в реку Охту по данным ГУП «Водоканал СПб» в 2017-2019 гг.

Год	2017	2018	2019
Общ. азот, мг/л	6,1	5,6	5,0
Общ. фосфор, мг/л	0,6	0,4	0,3
Цинк, мкг/л	33,0	46,0	41,0
Медь, мкг/л	4,8	6,3	5,3

Видно, что среднегодовая концентрация общего азота в поверхностном стоке с водосборного бассейна реки Охты превышает аналогичные показатели в странах США, Европы и Азии и сопоставима с концентрацией общего азота в поверхностном стоке в Иране.

Среднегодовые концентрации общего фосфора в поверхностном стоке с водосборного бассейна реки Охты приблизительно сопоставимы с

аналогичными показателями в других странах. А среднегодовые концентрации цинка и меди в поверхностном стоке с водосборного бассейна реки Охты оказываются значительно ниже, чем в других странах.

Поступление загрязняющих веществ с поверхностным стоком в водные объекты урбанизированных территорий является острой экологической проблемой во многих странах. Существенное внимание решению этой проблемы уделяется в США. В этой стране существует федеральный закон «О Чистой воде» (US Water Pollution Control Act. 1972). В этом документе указываются требования к сбору и очистке распределённого поверхностного стока.

Агентство по охране окружающей среды США отмечает, что поступающий в водные объекты поверхностный сток служит основным источником поступления загрязняющих веществ в водные объекты в городах. Эта организация отмечает, что 77 из 127 приоритетных загрязняющих веществ США обнаружены в поверхностном стоке (тяжелые металлы, биогенные элементы (табл. 3.6), пестициды и др.) (US Source Water Protection Practices Bull. 2001). Решение проблемы снижения объёмов поступления загрязняющих веществ в водные объекты с поверхностным стоком осложняет то, что, как правило, поверхностный рассеянный сток сбрасывается в водные объекты без очистки. По данным отчетных материалов ГУП «Водоканал СПб», это происходит в Санкт-Петербурге.

Таблица 3.6. Осредненные концентрации общего азота и фосфора в бытовых сточных водах и в водах ливневой канализации в США (J. Marsalek, 2015).

	Воды ливневой канализации	Бытовые сточные воды
Азот общий, мг/л	2,6	8,0-12,0
Фосфор общий, мг/л	0,3	2,2-10,0

Несомненно, концентрации токсических загрязняющих веществ, азота и фосфора в хозяйственно-бытовых сточных водах на порядок выше, чем в

поверхностном рассеянном стоке, поступающем в водные объекты (таблица 3.6). Но значительно большие объёмы поступления поверхностного стока в водные объекты и отсутствие очистки делает этот источник основным в загрязнении водных объектов урбанизированных территорий.

### 3.6. Поступление общего азота и фосфора с выпадениями атмосферных осадков.

Выпадение соединений азота и фосфора с атмосферными осадками исследуется учёными разных стран. Данные о концентрации соединений азота и фосфора в атмосферных осадках в разных странах приведены в таблицах 3.7 и 3.8. Из представленных таблиц 3.7 и 3.8 видно, что существует большой разброс объемов поступления соединений азота и фосфора с атмосферными осадками в разных странах. Наиболее близки значения концентраций соединений азота и фосфора в атмосферных осадках, выпадающих над акваторией Невской губы и восточной части Финского залива, в Польше, на Валдае и в Ленинградской области.

Таблица 3.7. Концентрации субстанций мг/л в атмосферных осадках

Регион	Аммоний	Нитриты	Нитраты	Мин. азот	Мин. фосфор	Общ. азот	Общ. фосфор	Источник
Utah, USA	н./д.	н./д.	н./д.	н./д.	н./д.	н./д.	0,142	Barrus, 2021
Rzeszów, Poland	0,64	0,032	1,00	н./д.	0,08	1,98	0,45	Koszelnik P., 2007
Urumqi, China	1,3	0,032	1,00	н./д.	н./д.	н./д.	н./д.	Li K. et al., 2013
Nanjing, China	1,09	1,46	н./д.	2,55	н./д.	н./д.	0,10	Sun L. et al., 2013
Валдай, Россия	0,196	0,020	0,077	н./д.	0,064	н./д.	н./д.	Гашкина, 2020
Москва, Россия	0,92	н./д.	1,77	н./д.	н./д.	н./д.	н./д.	Еремина, 2019
Воейково, Россия	0,40	н./д.	1,25	н./д.	н./д.	н./д.	н./д.	Свистов и др., 2023

Таблица 3.8. Объемы поступления субстанций с атмосферными осадками, г/м<sup>2</sup> в год

Регион	Аммоний	Нитраты	Мин. азот	Общий азот	Общий фосфор	Источник
Iowa, USA	0,027	0,150	н./д.	0,244	0,034	Anderson K.A., Downing J.A., 2006
Shenzhen, China	0,80	0,51	1,32	н./д.	н./д.	Huang, Y., Lu, X. and Chen, K., 2013
Beijing, China	1,33	0,62	2,79	н./д.	н./д.	Huang, Y., Lu, X. and Chen, K., 2013
Japan	1,00	0,70	1,70	н./д.	н./д.	Huang, Y., Lu, X. and Chen, K., 2013
Korea	0,70	0,36	1,06	н./д.	н./д.	Huang, Y., Lu, X. and Chen, K., 2013
Indonesia	0,21	1,27	3,40	н./д.	н./д.	Huang, Y., Lu, X. and Chen, K., 2013
Nanjing, China	1,23	1,64	н./д.	н./д.	0,11	Sun L. et al., 2013
Eastern China	н./д.	н./д.	н./д.	0,003	0,084	Zhai, S., 2009
Ленинградская область	н./д.	н./д.	н./д.	0,66	0,014	Минакова и Шлычков, 2018
Московская область	н./д.	н./д.	н./д.	0,95	0,038	Минакова и Шлычков, 2018
Акватория Финского залива Санкт-Петербург	0,265	0,828	н./д.	н./д.	н./д.	Свистов и др., 2023

Для расчётов нами использовалась полученная в результате картометрических измерений площадь акватории Невской губы и Финского залива в границах Санкт-Петербурга. Площадь составила 843,307 км<sup>2</sup>. Также для расчётов использовалась ежегодная норма атмосферных осадков в Санкт-Петербурге за 1990-2020 гг., которая, по данным Северо-западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, составляет 662 мм в год. Результаты расчётов представлены в таблице 3.9.

Полученные в таблице 3.9 значения отличаются значительным разбросом. Используя усредненные значения выпадения общего азота и фосфора, нормированные на единицу площади (г/м<sup>2</sup>) из таблицы 3.9, площадь акватории Невской губы и восточной части Финского залива в границах Санкт-Петербурга (843,307 км<sup>2</sup>) были рассчитаны усредненные значения объемов выпадения общего азота и фосфора на изучаемую акваторию. Выпадение общего азота составило 809,377 тонн в год, фосфора 80,942 тонн в год. Средние годовые значения поступления общего азота и фосфора в Невскую губу со

стоком реки Невы и её рукавов в 1979-2022 гг. составили: азот – 55092 тонн/год, фосфор – 1672 тонн/год (Герман и Серебрицкий, 2023). 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 значения не входят в оценку поступления общего азота и фосфора в Финский залив с территории Российской Федерации. Следует рассмотреть вопрос о включении выпадений азота и фосфора с атмосферными осадками в общую оценку поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива.

Таблица 3.9. Определение усредненных значений выпадения общего азота и фосфора с атмосферными осадками на акваторию Невской губы и Финского залива в границах Санкт-Петербурга, г/м<sup>2</sup> в год

Регион	Общий азот	Общий фосфор	Источник
Rzeszów, Poland	1,311	0,298	Koszelnik P., 2007
Валдай	0,253	0,050	Гашкина, 2020
Ленинградская область	0,660	0,014	Минакова и Шлычков, 2018
Воейково и Юсуповский сад (самостоятельные исследования)	1,615	0,023	Свистов и др., 2023; собственные исследования
Среднее	0,960	0,096	

## ГЛАВА 4. МОДУЛИ СТОКА СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА И ФОСФОРА С ПРИРОДНЫХ, СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО ЛИТЕРАТУРНЫМ ИСТОЧНИКАМ

Каждый водосборный бассейн уникален из-за сложного сочетания физико-географических условий на его поверхности. Это неповторимое сочетание природных ландшафтов и антропогенно-преобразованных систем на водосборе формирует сток с него. По этой причине, определение модулей стока субстанций (в том числе соединений азота и фосфора) является довольно сложной задачей. Благодаря тому, что в строении поверхностей разных водосборов существует определённое сходство, возможно проведение оценки стока субстанций с водосборных бассейнов, по которым отсутствуют данные мониторинга состава и объема стока. Это возможно делать использованием модулей стока субстанций со сходных по пространственному строению и расположенных в сходных климатических условиях водосборов.

Модули поступления общего азота и фосфора с водосборов разной степени урбанизации и хозяйственного преобразования представлены в таблице 4.1.

Предпринимаются попытки установления взаимосвязей между величинами модулей стока субстанций и пространственным строением водосборных бассейнов (таблица 4.1). Уровень антропогенного преобразования водосборного бассейна является одним из основных факторов, влияющих на сток общего азота и фосфора. 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 (Baltic Sea Action Plan, 2021) и аналогичные модули для других водосборов с меньшей степенью антропогенного преобразования (Сестра, Систа, Коваша, Караван). Результаты собственных исследований по

определению модулей стока общего азота и фосфора для городских водосборов реки Охты и Волковки дают схожие с коллегами результаты.

Таблица 4.1. Модули стока общего азота и фосфора, т/год•км<sup>2</sup>

Водосбор	Азот	Фосфор	Источник
Куршская коса (Россия, Латвия, Беларусь)	0,018	0,001	Чубаренко и др., 2017
Сестра река (Санкт-Петербург и Ленинградская область, Россия)	0,031	0,002	Кондратьев и др., 2018
Стрелка река (Санкт-Петербург и Ленинградская область, Россия)	0,029	0,002	Кондратьев и др., 2018
Систа река (Санкт-Петербург и Ленинградская область, Россия)	0,029	0,002	Кондратьев и др., 2018
Ковалиха река (Санкт-Петербург и Ленинградская область, Россия)	0,040	0,003	Кондратьев и др., 2018
Караста река (Санкт-Петербург и Ленинградская область, Россия)	0,034	0,003	Кондратьев и др., 2018
Ладожское озеро (Россия)	0,143	0,004	Кондратьев, 2011
Нарва река (Россия, Эстония)	0,102	0,004	Кондратьев, 2011
США, штат Мэн, лесной ландшафт	-	0,005	Brylinsky M., 2004
Шингарка река (Санкт-Петербург и Ленинградская область, Россия)	0,051	0,005	Кондратьев и др., 2018
<u>Норма Helcom</u>	0,236	0,011	Baltic Sea Action Plan, 2021
Финский залив, восточная часть (Санкт-Петербург и Ленинградская область, Россия)	0,275	0,012	Кондратьев и др., 2018
Калининградский залив (Россия, Польша)	0,249	0,020	Чубаренко и др., 2017
Луга река (Новгородская и Ленинградская область, Россия)	0,349	0,027	Кондратьев, 2011
Красненькая река (Санкт-Петербург, Россия)	0,312	0,029	Кондратьев и др., 2018
США, штат Мэн, селитебные территории	-	0,035	Brylinsky M., 2004
Водосборы малых рек Невской губы и восточной части Финского залива (Россия)	0,550	0,040	Кондратьев и др., 2014
Петрозаводск (Республика Карелия, Россия)	2,608	0,042	Лозовик и др., 2016
St. Paul (штат Миннесота, США)	0,230	0,047	Janke Benjamin D. et al., 2014
Канада, Новая Шотландия, леса на магматических породах	-	0,048	Brylinsky M., 2004
Озеро Неро (Ярославская область, Россия)	-	0,052	Кондратьев и др., 2018
Ижора река (Санкт-Петербург и Ленинградская область, Россия)	1,100	0,085	Ершова, 2013
Волковка река (Санкт-Петербург, Россия)	1,295	0,104	Собств. расчёты
Канада, Онтарио, Урбанизированные территории	-	0,110	Brylinsky M., 2004
Охта река, частный водосбор (Санкт-Петербург, Россия)	1,799	0,134	Собств. расчёты
Нева река, частный водосбор (Санкт-Петербург и Ленинградская область, Россия)	0,696	0,144	Кондратьев, 2011
Англия (урбанизированные территории)	0,900	0,180	Butler and Davies, 2011
Канада, Онтарио, Селитебные территории	-	0,186	Brylinsky M., 2004
США (урбанизированные территории)	0,800	0,330	Jolankai G.. 1983
США, штат Мэн, сельскохозяйственные территории	-	0,350	Brylinsky M., 2004

Зарубежными учеными (Brylinsky M., Janke Benjamin D., Butler and Davies, Jolankai G.) (таблица 4.1) 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. Согласно исследованию Brylinsky (2004) поступление общего фосфора с лесных ландшафтов штата Мэн (США) ( $0.005 \text{ т/год с км}^2$ ) в 70 раз ниже, чем с сельскохозяйственных территорий этого же штата ( $0.350 \text{ т/год с км}^2$ ). Зарубежные и отечественные авторы приходят к схожим выводам и значениям модулей стока азота и фосфора с водосборов со сходными природно-климатическими условиями и степенью антропогенного преобразования. Необходимо отметить, что проблема оценки объемов выноса соединений азота и фосфора с водосборных бассейнов является глобальной.

Ориентиром максимально допустимой антропогенной нагрузки на экосистему Балтийского моря служат нормы HELCOM, которые были установлены в 2007 году Планом действий по Балтийскому морю (ПДБМ) и уточнены в 2021 (Baltic Sea Action Plan, 2021). Согласно Плану 2007 года к 2021 году предполагалось восстановить экологическое благополучие экосистемы Балтийского моря за счет сокращения поступления азота и фосфора антропогенного происхождения (Baltic Sea Action Plan, 2007). Но уже в 2018 году стало ясно, что целей Плана 2007 года к 2021 году достичь не получится (Обновленный План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю до 2030 года). Установленные в 2021 году максимально допустимые объемы поступления общего азота и фосфора для Балтийского моря в целом и его частей представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Среднегодовые максимально допустимые объемы поступления общего азота и фосфора в Балтийское море и его части в соответствии с уточненным ПДБМ 2021 года (Baltic Sea Action Plan, 2021).

Часть Балтийского моря	Среднегодовое максимально допустимое поступление	
	Общего азота, тонн/год	Общего фосфора, тонн/год
Ботнический залив	57622	2675
Ботническое море	79372	2773
Балтийский регион (центральная часть)	325000	7360
<u>Финский залив</u>	<u>101800</u>	<u>3600</u>
Рижский залив	88417	2020
Датские проливы	65998	1601
Каттегат	74000	1687
<u>Всего по Балтийскому морю</u>	<u>792209</u>	<u>21716</u>

Фактическое поступление общего азота и фосфора в Балтийское море превышает максимально допустимое. В 2021 году в него поступило 861434 тонн общего азота и 25732 тонн общего фосфора, что соответственно на 9 и 18 % больше максимально допустимого объема (Поступление биогенных элементов с суббассейнов Балтийского моря, 2024). В Финский залив за 2021 год поступило 119973 тонн общего азота и 4266 тонн общего фосфора. Эти значения соответственно на 18 и 19 % выше максимально допустимого количества согласно ПДБМ. К сожалению, пока не достигнуты показатели, при которых ожидается достижение экологического благополучия Балтийского моря. Важно отметить, что с 1997-2003 гг. к 2021 г. годовое поступление общего азота и фосфора в Балтийское море сократилось на 11 и 30 % соответственно. Большое влияние на это сокращение оказала природоохранная деятельность на российской части водосборного бассейна Балтийского моря.

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). Модель позволяет имитировать потоки азота и фосфора в морской экосистеме и их влияние на функционирование морской экосистемы, процессы эвтрофирования. В основе функционирования модели лежит тесная взаимосвязь суббассейнов Балтийского моря и всех компонентов морской экосистемы (Wulff et al., 2013).

Для пересмотра ПДБМ использовалась другая физико-биогеохимическая модель BALTSEM тех же авторов (Wulff et al., 2013). При создании этой модели использовались разработки SANBALTS. Но новая модель BALTSEM отличается более высоким пространственным и вертикальным разрешением. В модель BALTSEM добавлена возможность рассмотреть сценарии влияния изменения климата на эвтрофирование Балтийского моря (Wulff et al., 2013).

План действий по Балтийскому морю предполагает сокращение стока соединений азота и фосфора с территории государств, состоящих в HELCOM (Финляндия, Швеция, Дания, Россия, Латвия, Литва, Эстония, Германия и Польша). Для каждой страны рассчитаны свои уровни этого сокращения. Расчёт производится в два этапа. Сначала рассчитывается величина сокращения сброса из-за повышения степени очистки сточных вод до уровня требований Helcom 28E/5, 28E/6 и Директивы ЕС по очистке городских сточных вод. После этого оставшееся значение, на которое необходимо сократить поступление общего азота и фосфора, распределяется по частям Балтийского моря, указанным в таблице 4.2, в зависимости от существующей нагрузки с территорий различных стран на отдельные части Балтийского моря (Степанова, 2009).

Такой подход в распределении биогенной нагрузки имеет следующие недостатки:

1. Не учитываются ландшафтные и социально-экономические особенности водосборов частей Балтийского моря;
2. Не учитываются величины фонового (природного) поступления с территории стран - участниц HELCOM.

Как отмечено выше, сток соединений азота и фосфора с урбанизированных и сельскохозяйственных территорий, как правило, превышает нормы HELCOM (таблица 4.1). Высокие значения стока соединений азота и фосфора характерны не только для урбанизированного водосбора Балтийского моря, но и, например, для антропогенно-преобразованных водосборов в США и Канаде. Следовательно, для сокращения антропогенного поступления азота и фосфора в Балтийское море следует сократить сток этих элементов с антропогенно-преобразованных территорий.

Данные из таблицы 4.1 показаны на рисунках 4.1 и 4.2 На обоих рисунках красным цветом показаны модули стока, превышающие норму HELCOM (показана желтым цветом), а зелёным цветом показаны модули стока ниже этой нормы. Санкт-Петербург расположен на территории частных водосборных бассейнов реки Невы, Невской губы и восточной части Финского залива. Из рис. 4.1 и 4.2 видно, что сток общего азота и фосфора с частного водосборного бассейна реки Невы превышает нормы HELCOM. Поэтому необходимо дальнейшее сокращение поступления соединений азота и фосфора с частных водосборов Невской губы и восточной части Финского залива.

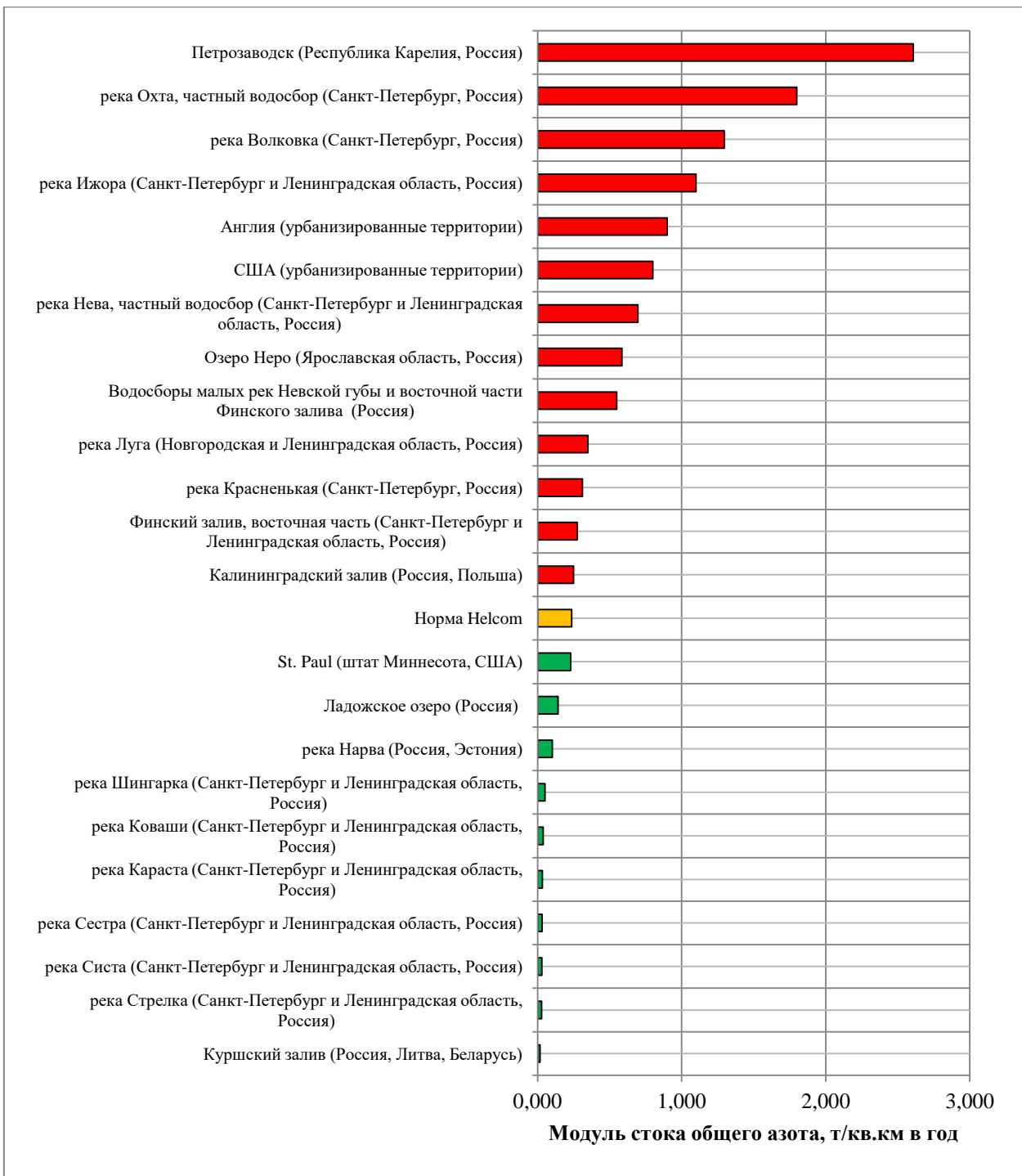


Рисунок 4.1. Модули стока общего азота, тонн/ км<sup>2</sup> в год (по данным из табл. 4.1)

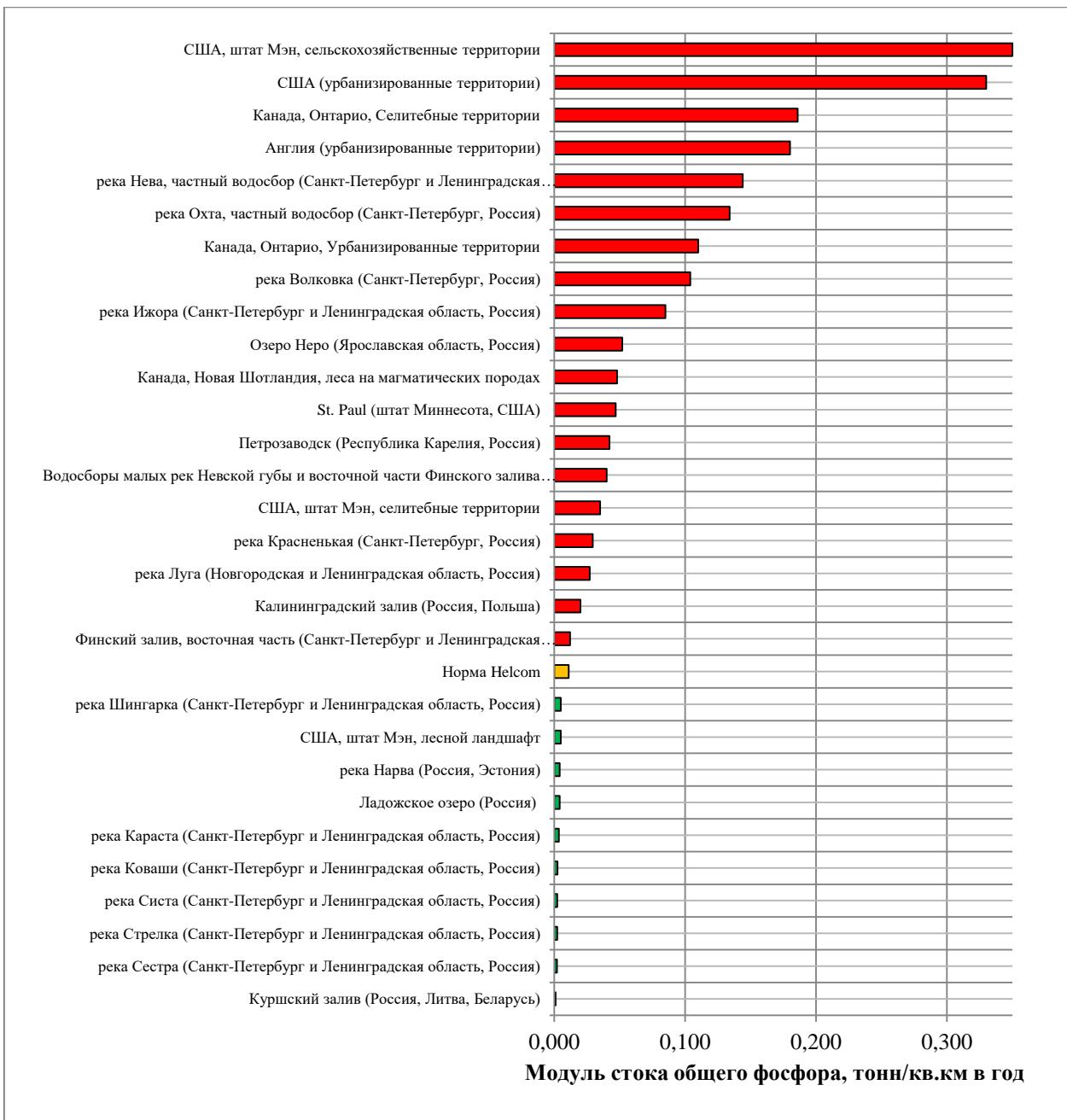


Рисунок 4.2. Модули стока общ. фосфора, тонн/ км<sup>2</sup> в год (данные из табл. 4.1 )

Все перечисленные исследования имеют региональную специфику. Модули стока субстанций, определённые для водосборов одного региона, необходимо с осторожностью применять для оценки стока с водосборами других регионов. Однако методика оценки величины стока субстанций с водосборных бассейнов, разработанная для одного региона, может применяться для оценки модулей стока субстанций с водосборами других регионов. Разумеется, при этом может потребоваться модификация этой методики.

## ГЛАВА 5. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 5.1. Особенности мониторинга поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского со стоком водотоков Санкт-Петербурга

Для обеспечения полной и достоверной информации в целях принятия решений в сфере охраны Балтийского моря от антропогенного загрязнения и эвтрофирования Россия проводит регулярные наблюдения за состоянием поверхностных вод на водосборном бассейне этого моря. Северо-западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗУГМС) осуществляет регулярные наблюдения за качеством воды водных объектов в Санкт-Петербурге (Герман и Серебрицкий 2023). СЗУГМС ежемесячно проводит исследования качества воды на 13 водотоках в черте Санкт-Петербурга. По результатам мониторинга химического состава водных объектов ежегодно проводится оценка поступления общего азота и фосфора со стоком рек Санкт-Петербурга. Официальная оценка, производимая СЗУГМС, включает только поступление общего азота и фосфора со стоком реки Невы и её рукавов. Однако в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга впадают ещё 26 водотоков (рис. 5.1). При этом неизвестно, какие количества общего азота и фосфора поступают в Невскую губу и восточную часть Финского залива со стоком этих водотоков. Поэтому существующая оценка поступления общего азота и фосфора со стоком водотоков Санкт-Петербурга не является полной.

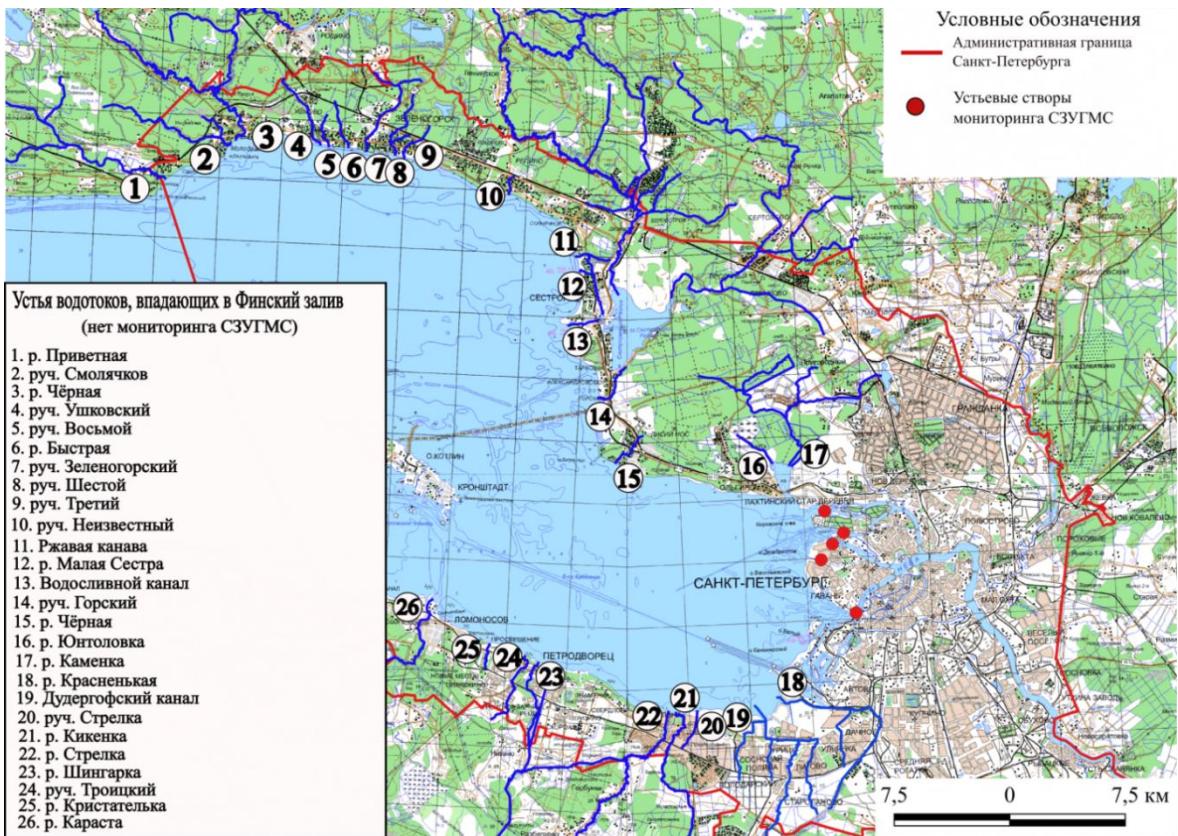


Рисунок 5.1. Мониторинг поступления общего азота и фосфора со стоком водотоков Санкт-Петербурга

## 5.2. Объекты исследования

В качестве объектов исследований были выбраны водосборы водотоков и водоемов, биогенный сток с которых не учитывается при определении поступления азота и фосфора в Невскую губу и Финский залив с территории Санкт-Петербурга: р. Приветной, Смолячкова ручья, р. Чёрной, Ушковского ручья, Восьмого ручья, р. Быстрой, Зеленогорского ручья, Шестого ручья, Третьего ручья, Сестрорецкого Разлива, р. Чёрной (Лахта), Лахтинского Разлива, Лиговского канала и р. Красненькой, р. Дудергофки и Дудергофского канала, ручья Стрелка, р. Кикенки, рек Шингарки и Стрелки, Троицкого ручья, р. Кристательки, р. Каасты (рис. 5.2). Также были выделены береговые водосборы северного берега Финского залива в пределах Курортного района Санкт-Петербурга, и водосборы северного и южного побережий Невской губы. Для ориентировочного определения объёмов поступления соединений азота и

фосфора со всех этих водосборов в Невскую губу и восточную часть Финского залива были использованы результаты мониторинга состава и расходов стока на реках Волчьей, Вруде, Ижоре, Мге, Тосне и Оредеже (рис. 5.2).

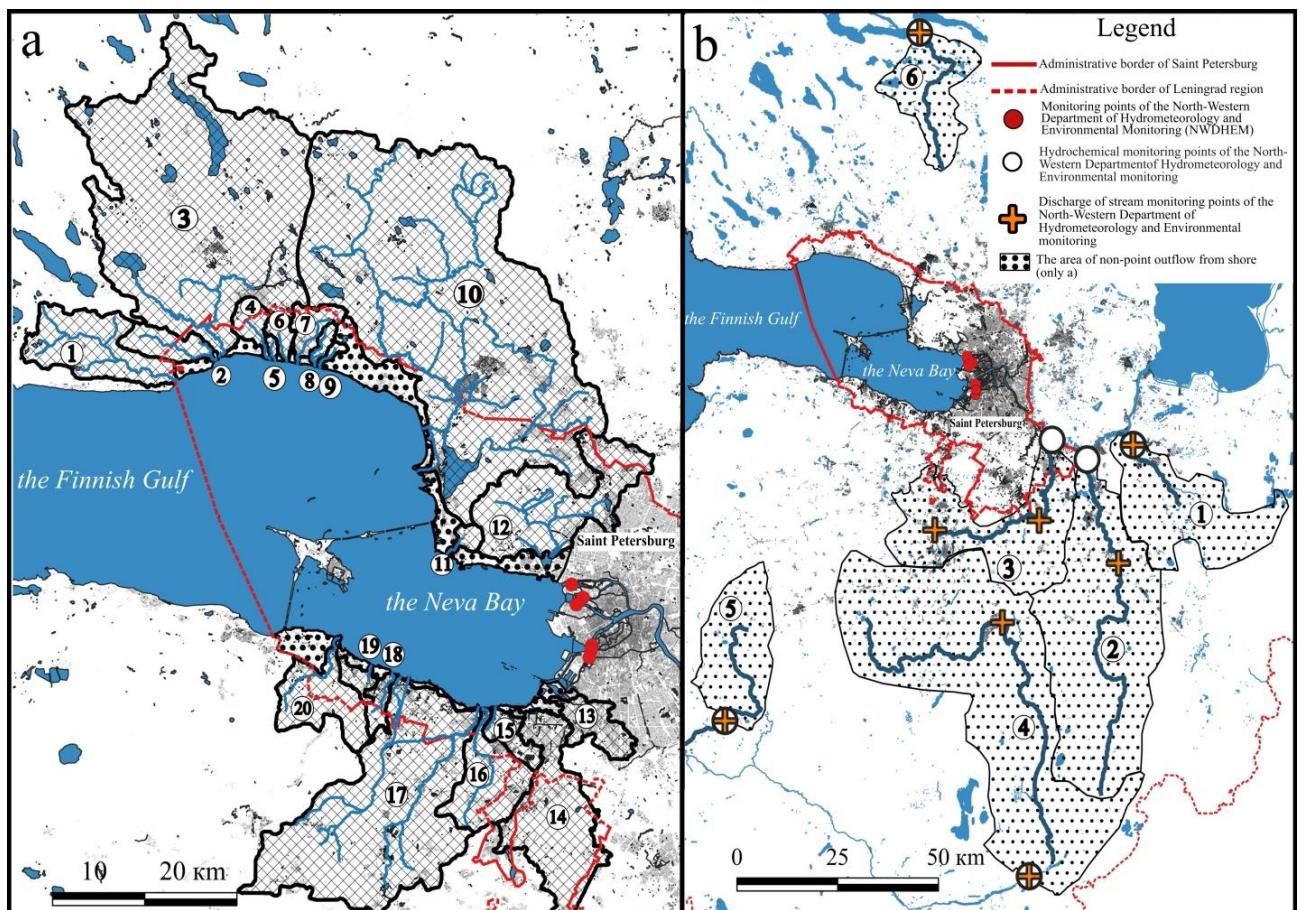


Рисунок 5.2. Водосборы Невской губы и восточной части Финского залива и водосборы-аналоги. Изображение а: Водосборы: 1) р. Приветная, 2) Смолячков ручей, 3) р. Чёрная, 4) Ушковский ручей, 5) Восьмой ручей, 6) р. Быстрая, 7) Зеленогорский ручей, 8) Шестой ручей, 9) Третий ручей, 10) Сестрорецкий Разлив, 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. Кааста. Изображение б (водосборы-аналоги): 1) р. Мга, 2) р. Тосна, 3) р. Ижора, 4) р. Оредеж, 5) р. Вруде, 6) р. Волчья

### 5.3. Методика определения модулей стока соединений азота и фосфора с водосборов

Методика определения модулей стока соединений азота и фосфора с водосборов, сток с которых не учитывается при оценке поступления азота и фосфора в Невскую губу и Финский залив с территории Санкт-Петербурга, представлена в виде блок-схемы на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3. Блок-схема методики определения модулей стока

#### 5.3.1. Использование цифровых моделей рельефа для выделения водосборных бассейнов

Первым этапом методики определения модулей стока субстанций с водосборов является выделение границ этих водосборов. Выделение водосборов в среде ГИС выполняется на основании цифровых моделей рельефа. Для выделения обширных водосборов наиболее популярными глобальными ЦМР являются ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) и SRTM (Shuttle radar topographic mission). Рассмотрим характеристики этих моделей.

Продукт ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) разработан совместно Министерством экономики, торговли и промышленности (METI)

Японии и Национальным управлением по аeronавтике и исследованию космического пространства США (NASA). Первая версия ASTER GDEM была выпущена в июне 2009 г. Эта ЦМР создана на основе данных сенсора ASTER спутника Terra. Сенсор работал в инфракрасном диапазоне. Охват ASTER GDEM простирается от 83 ° с.ш. до 83 ° ю.ш., покрывая 99 % суши Земли. ASTER GDEM имеет глобальное разрешение 90 м и разрешение 30 м в пределах территории США. Несмотря на высокое разрешение и большой охват, модель имеет множество ошибок в определении высот в облачных районах (Мальцев и др., 2018).

SRTM (Shuttle radar topographic mission) – международная миссия по получению данных цифровой модели рельефа (ЦМР) территории Земли. Съемка поверхности Земли проведена в феврале 2000 г. с борта космического корабля многоразового использования Shuttle с помощью радарной интерферометрической камеры и двух радиолокационных сенсоров SIR-C и X-SAR. В результате была создана матрица высот, охватывающая территорию суши от 60° с.ш. до 54° ю.ш., а также некоторые морские акватории. Данные SRTM существуют в нескольких версиях. Данные SRTM с размером ячеек 1x1 угловые секунды, то есть с пространственным разрешением 30 м являются более точными, но, к сожалению, доступны лишь на территорию США. На остальную поверхность Земли доступны только данные SRTM с размером ячейки 90x90 м (Мальцев и др., 2018).

Обе описанные ЦМР находятся в свободном доступе.

Наиболее современной и точной ЦМР является WorldDEM – высокоточная глобальная цифровая модель рельефа (ЦМР) компании Airbus Defence and Space. WorldDEM создается по интерферометрическим парам радарных снимков спутников TerraSAR-X и TanDEM-X и превосходит все существующие на сегодняшний день ЦМР, полученные по данным дистанционного зондирования Земли.

Отличительной особенностью этой ЦМР является относительная точность 2 м и абсолютная точность 4 м. Пространственный охват распространяется на широты севернее 60° с.ш. без изменения точности. Размер ячеек составляет 12x12 м (Riegler et al., 2015). Указанная ЦМР является платной.

Сравнительные характеристики глобальных моделей рельефа и разработанной нами ЦМР представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. 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.	Санкт-Петербург и Ленинградская 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

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

### 5.3.2. Создание авторской цифровой модели рельефа по топографической карте для выделения водосборных бассейнов

Для создания цифровой модели рельефа на основе топографической карты сначала выполняется оцифровка её горизонталей. Нами была использована

топографическая карта Санкт-Петербурга и Ленинградской области 2001 г. масштабом 1:200000. Эта карта применялась для создания ЦМР удалённых от центра Санкт-Петербурга территорий. Для территорий Санкт-Петербурга, занятых многоэтажной жилой застройкой и промышленными зонами, была использована карта-схема высот Санкт-Петербурга (рис. 5.4). С её помощью также были скорректированы высоты ЦМР ASTER GDEM.

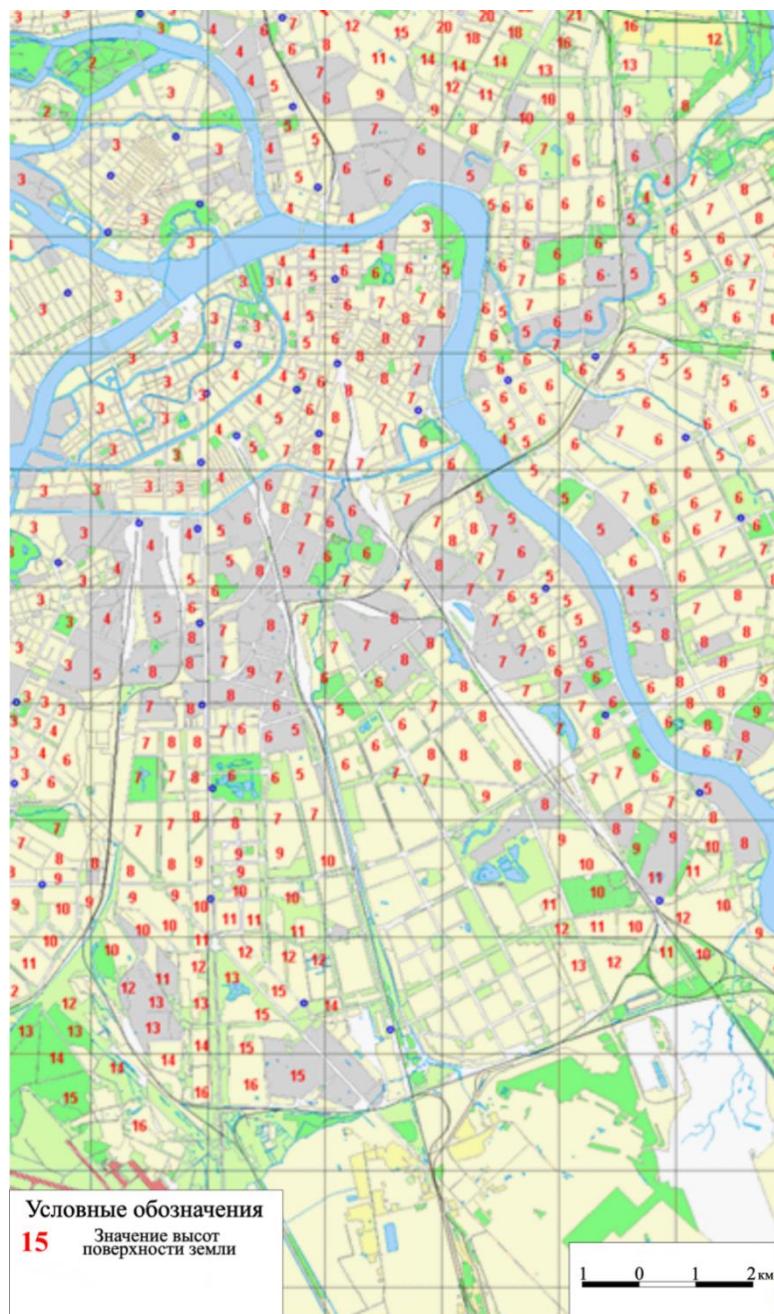


Рисунок 5.4. Фрагмент карты-схемы высот поверхности Санкт-Петербурга ([http://not.textual.ru/zverik/2/3/spb\\_heights.gif](http://not.textual.ru/zverik/2/3/spb_heights.gif))

Оцифровкой горизонталей топографической карты был создан шейпфайл векторных линейных объектов, в таблице атрибутов которого были записаны значения высот горизонталей (рис. 5.5).

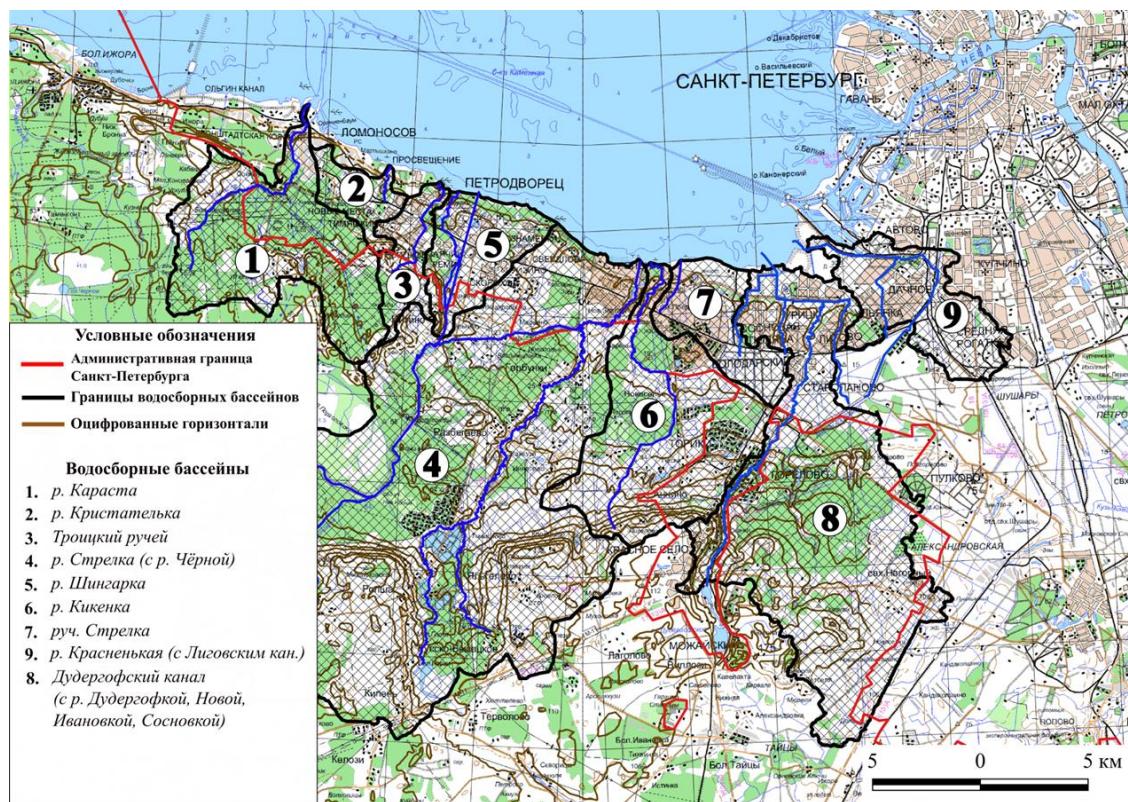


Рисунок 5.5. Оцифровка горизонталей топографической карты для определения границ водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива с юга

С использованием инструментов QGIS вдоль этих линейных объектов через каждые 100 м были расставлены точки. Таблица атрибутов слоя точек содержит значения высот горизонталей. В ArcGIS интерполяцией слоя точек методом «Universal kriging» был создан растр ЦМР с размерами ячеек 100 на 100 м. Использование данного метода интерполяции позволяет использовать существенно нерегулярную сетку исходных значений. Также выбор такого метода интерполяции обусловлен тем, что в нём автоматически определяется радиус поиска (расстояние, на котором ещё существует взаимосвязь между значениями). Полученная в результате интерполяции матрица высот затем была модифицирована следующим образом: были созданы буферные зоны водотоков

ширина 100 м, и в пределах этих зон значения высот в ячейках растра ЦМР были уменьшены на 5 м.

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.

На рисунке 5.6 приведён результат выделения водосборных бассейнов водотоков, впадающих в Невскую губу с её южного берега с помощью авторской цифровой модели рельефа, созданной на основе топографической карты.

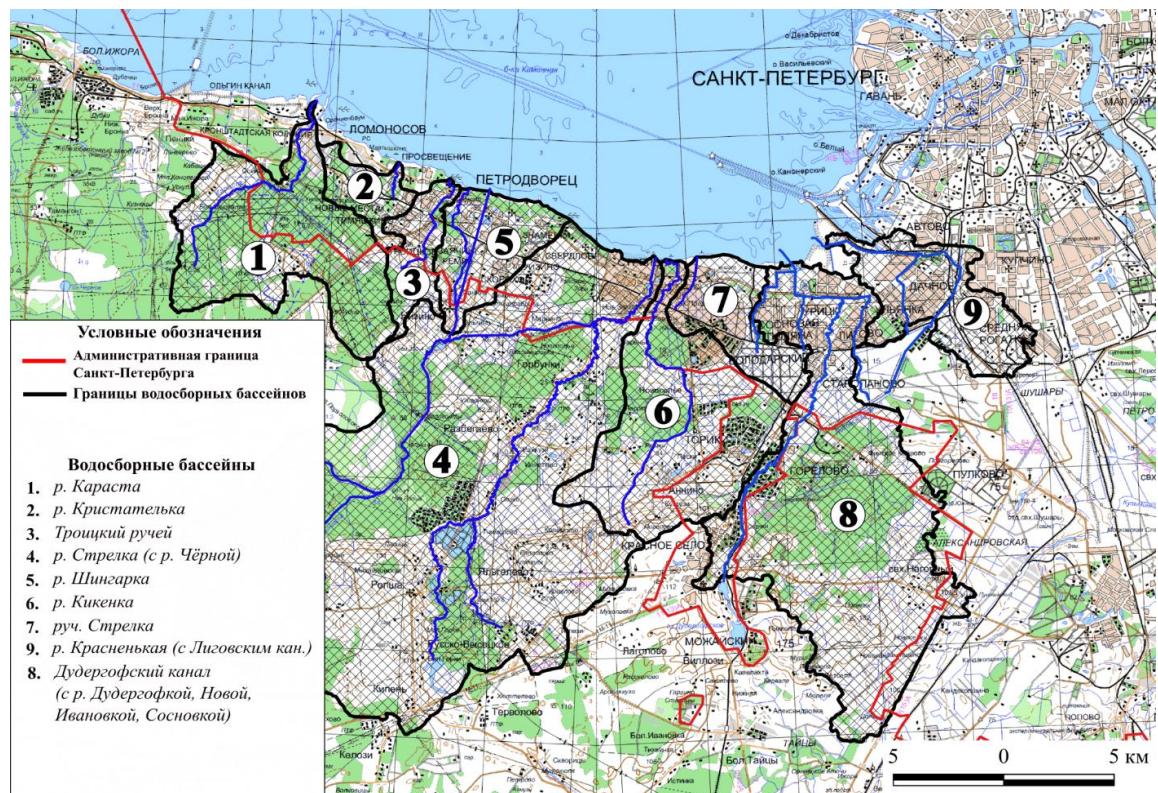


Рисунок 5.6. Границы водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу с юга

Водосборные бассейны р. Красненькой и Дудергофского канала с притоками были выделены с помощью авторской цифровой модели рельефа, созданной на основе топографической карты, и с помощью модифицированного нами участка ЦМР ASTER GDEM (раздел 5.3.3). Границы этих водосборов, выделенных с использованием двух разных ЦМР, различаются незначительно, не более чем на 10 % (подробнее в разделе 5.3.4). На рисунках 5.5. и 5.6. показаны границы водосборов, выделенные по авторской ЦМР, созданной на основе топографической карты.

### 5.3.3. Модификация цифровой модели рельефа ASTER GDEM для выделения урбанизированных водосборных бассейнов

Ячейки матрицы ЦМР ASTER GDEM содержат значения, полученные по стереопарам видимого диапазона (Мальцев и др., 2018). Зачастую трудно отделить поверхность воды от поверхности суши. Для создания в среде ГИС адекватной реальности сети линий стока необходимо учесть существующую гидрографическую сеть. Водотоки имеют глубину, они врезаны в рельеф. Поэтому необходимо уменьшать значения высот ячеек, через которые протекают существующие водотоки. Впоследствии на основании создаваемого слоя ячеек стока создаётся матрица водосборных бассейнов, которая потом конвертируется в векторный полигональный слой.

ЦМР ASTER GDEM требует значительной модификации для возможности её применения для выделения водосборов на территориях Санкт-Петербурга с плотной застройкой. Такая модификация была нами выполнена для выделения границ частного водосбора реки Охты ниже плотины Ржевского водохранилища, водосборов реки Волковки, р. Красненькой и Лиговского канала, Дудергофского канала и р. Дудергофки с притоками (рис. 5.7).

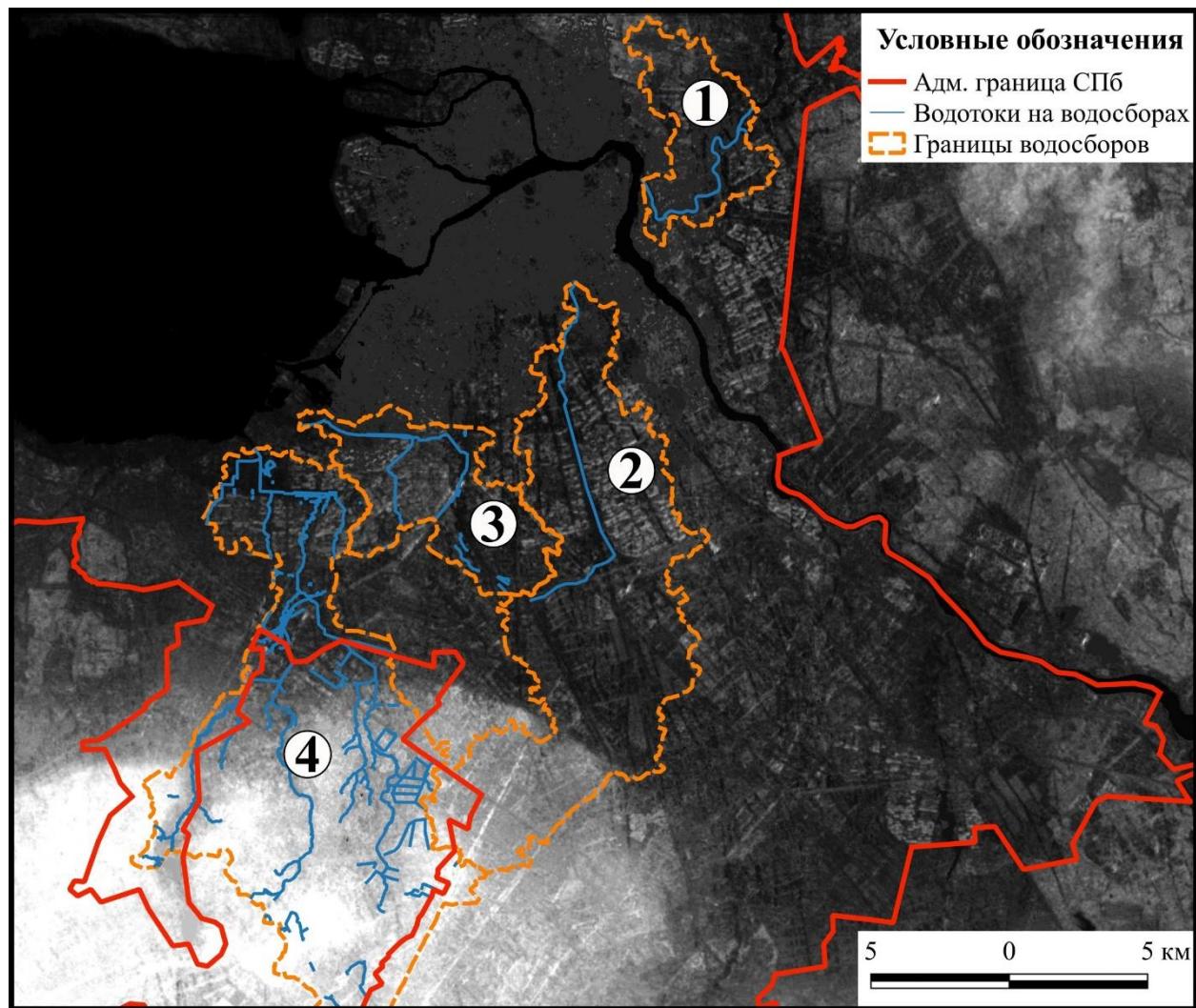


Рисунок 5.7. Использование ЦМР Aster GDEM для определения границ частного водосбора реки Охты ниже плотины Ржевского водохранилища (1), водосборов реки Волковки (2), р. Красненькой и Лиговского канала (3), Дудергофского канала и р. Дудергофки с притоками (4)

Модификация связана с искажением высот поверхности Земли от тех объектов, которые на ней расположены. На выделенных водосборах расположена многоэтажная жилая застройка высотой до 26 этажей (ок. 80 м). Это приводит к искажениям высотных отметок. Например, на водосборе р. Волковки многоэтажная жилая застройка выглядит как белые пятна. Это хорошо видно при увеличении фрагмента ЦМР и совмещении его с очертаниями городской квартальной застройки на снимке Яндекс (рис. 5.8).

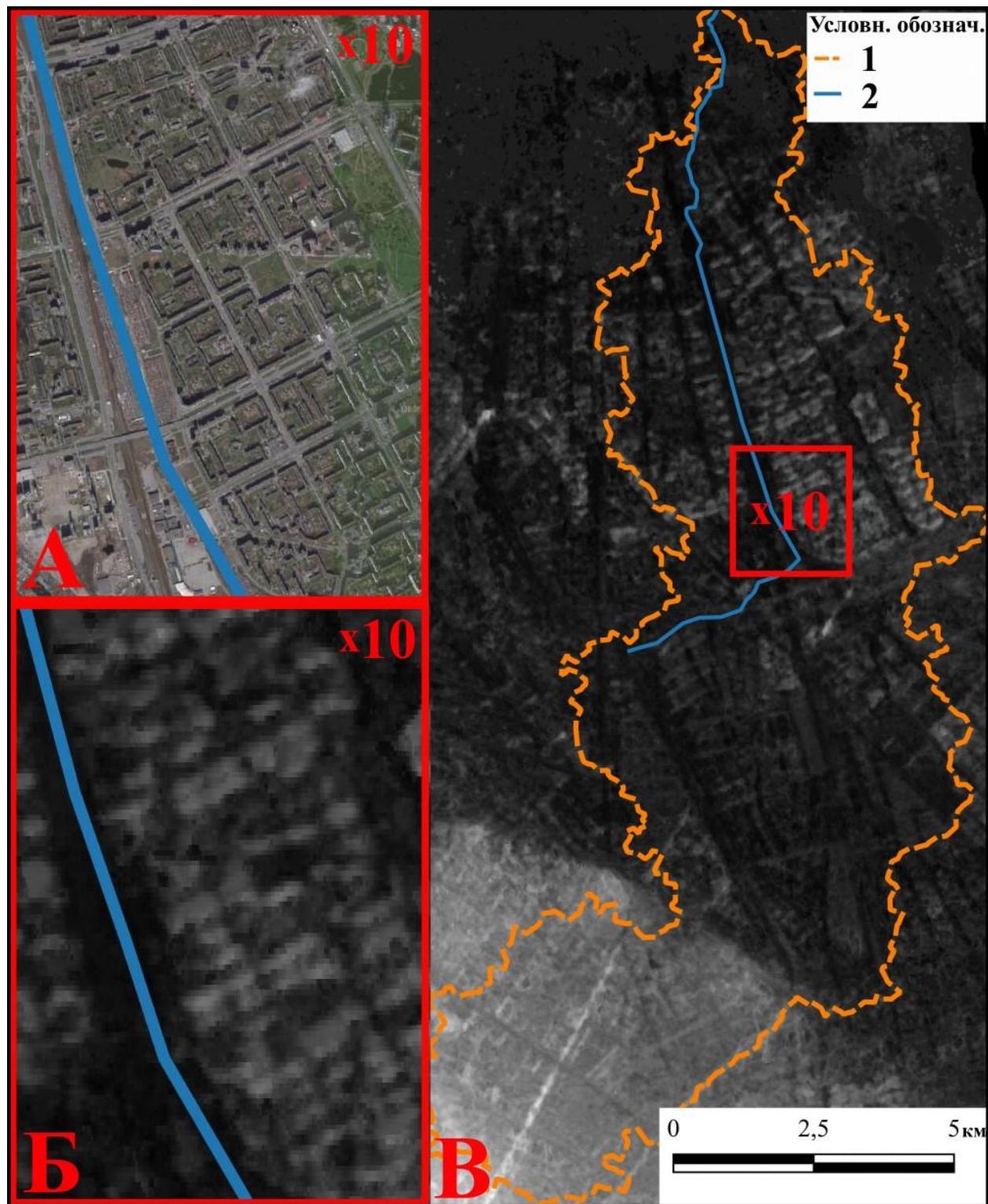


Рисунок 5.8. Искажение высотных отметок ЦМР Aster GDEM из-за многоэтажной жилой застройки на примере водосбора р. Волковки. Фрагмент ЦМР Aster GDEM (Б) и снимок Яндекс (А) увеличен в 10 раз относительно исходного (В). 1 – граница водосборного бассейна реки Волковки, 2 – река Волковка.

Поэтому ASTER GDEM, как и любая другая глобальная ЦМР, имеет искажения относительно реальной высоты местности в несколько десятков метров (рис. 5.8).

Для удаления искажений участок исходной ЦМР ASTER GDEM в файле формата GeoTiff был преобразован в ГИС SAGA с использованием инструмента «Grid to points» в векторный слой точек. Точки созданного векторного слоя унаследовали в качестве атрибута значения высот из исходного растра ЦМР. Точки были распределены по сетке квадратов со сторонами 1 км по отдельным слоям электронной карты. Внутри каждого квадрата с помощью карты-схемы высот поверхности Санкт-Петербурга были определены диапазоны значений истинных высот поверхности земли (рис. 5.4). Далее в таблицах атрибутов слоев точек были удалены все объекты со значениями, превышающими истинные значения высот поверхности. Затем слои точек с истинными значениями высот поверхности были объединены в один векторный слой.

Полученный векторный слой точек с истинными значениями высот поверхности прошёл верификацию совмещением со снимками Яндекс-карт, на которых четко видны крыши домов. В ручном режиме редактировался слой точек высотных отметок с удалением точек, расположенных в пределах многоэтажных строений.

Для учёта русел существующих водотоков требовалась дальнейшая коррекция слоя точек высотных отметок. Поэтому на основании линейных объектов водотоков были созданы буферные зоны шириной 100 м для выборки точек высотных отметок поверхности. Попавшие внутрь буферных зон точки были сохранены в новый слой и удалены из исходного слоя. Таким образом, были созданы 2 векторных слоя точек:

- 1) Точки высот внутри буферных зон водотоков;
- 2) Точки истинных высот поверхности.

В таблице атрибутов слоя точек внутри буферных зон водотоков было выполнено уменьшение значений высот с помощью инструмента «Калькулятор полей» QGIS. Точки в буферных зонах водотоков были «углублены» на 5 м. После этого слой «углубленных» точек был объединен со слоем точек истинных высот. По данным этого объединенного слоя точек в ГИС SAGA была выполнена интерполяция методом «Обратно взвешенное расстояние», и был создан новый растр высот. Дальнейшее выделение водосборных бассейнов было выполнено инструментом ArcGIS «Watershed» аналогично тому, как это выделение производилось с помощью ЦМР, созданной на основании топографической карты.

#### 5.3.4. Сравнительный анализ результатов определения границ водосборов разными методами

Как указано выше, для определения границ водосборных бассейнов были использованы две цифровые модели рельефа (ЦМР): модифицированная автором ASTER GDEM и авторская ЦМР, созданная на основе топографической карты Санкт-Петербурга и Ленинградской области 2001 г. масштабом 1:200000. Для территории многоэтажной жилой застройки была использована карта-схема высот Санкт-Петербурга ([http://not.textual.ru/zverik/2/3/spb\\_heights.gif](http://not.textual.ru/zverik/2/3/spb_heights.gif)). С помощью созданной на основе топографической карты авторской ЦМР в ArcGIS были определены границы всех водосборных бассейнов южного и северного побережий Невской губы и восточной части Финского залива. Границы водосборных бассейнов р. Дудергофки и Дудергофского канала с притоками, Лиговского канала и реки Красненькой были определены с использованием двух ЦМР: созданной на основе топографической карты и модифицированной автором ЦМР ASTER GDEM (табл. 5.2).

Границы водосборов-аналогов реки Мги, Ижоры, Тосны, Оредежа, Вруды, Волчьей определялись с помощью авторской ЦМР, созданной на основе топографической карты.

Таблица 5.2. Использование ЦМР для определения границ водосборных бассейнов («<sup>1</sup> – полученная с использованием топографической карты; «<sup>2</sup> – модифицированная автором)

№	Водосбор	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Использованная для выделения водосбора ЦМР
1	р. Приветной	83,6	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
2	Смолячкова ручья	26,5	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
3	р. Чёрной	544,1	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
4	Ушковского ручья	15,6	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
5	Восьмого ручья	2,6	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
6	р. Быстрой	9,8	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
7	Зеленогорского ручья	19,9	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
8	Шестого ручья	6,2	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
9	Третьего ручья	3,1	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
10	Сестрорецкого Разлива	766,1	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
11	р. Чёрной (Лахта)	7,6	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
12	Лахтинского Разлива	135,7	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
13	Лиговского канала и р. Красненькой	31,6	Авторская ЦМР <sup>1</sup> , Aster GDEM ЦМР <sup>2</sup>
14	р. Дудергофки и Дудергофского канала	126,7	Авторская ЦМР <sup>1</sup> , Aster GDEM ЦМР <sup>2</sup>
15	Ручья Стрелка	19,0	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
16	р. Кикенки	65,4	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
17	Рек Шингарки и Стрелки	324,7	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
18	Троицкого ручья	12,7	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
19	р. Кристателька	10,1	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
20	р. Каасты	59,6	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
21	северного берега Финского залива	68,7	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
22	северного берега Невской губы	20,7	Авторская ЦМР <sup>1</sup>
23	южного берега Невской губы	40,1	Авторская ЦМР <sup>1</sup>

Как видно из таблицы 5.2, две полученные разными методами ЦМР были совместно использованы для определения границ водосборных бассейнов р. Дудергофки и Дудергофского канала с притоками, Лиговского канала и реки Красненькой. Разумеется, необходимо сравнение результатов выделения

водосборных бассейнов с использованием разных методик. Определение границ водосборных бассейнов выполнено в среде ArcGIS по методикам, представленным в разделах 5.3.2 и 5.3.3. С использованием разных ЦМР были выделены границы одних и тех же водосборных бассейнов. Сравнение полученных границ водосборных бассейнов представлено на рисунке 5.9.

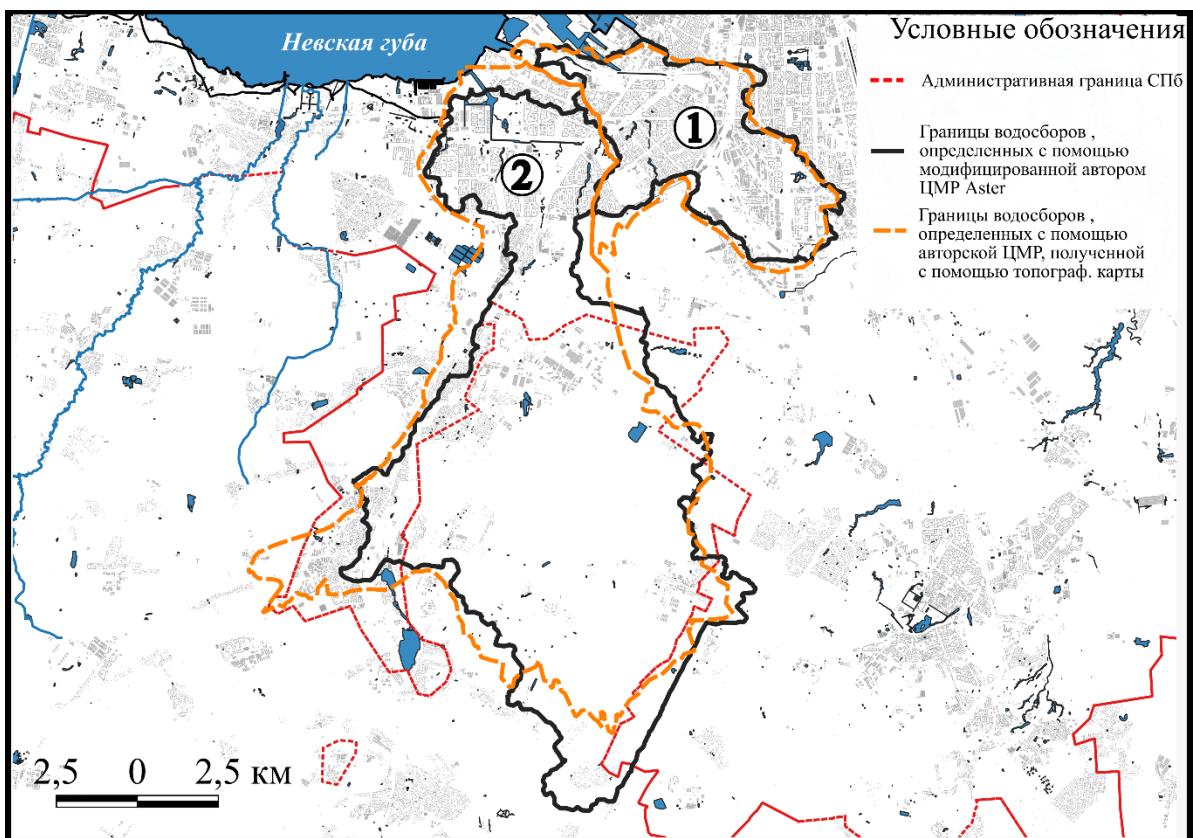


Рисунок 5.9. Результаты использования разных ЦМР для определения границ водосборных бассейнов в юго-западной части Санкт-Петербурга. 1 – водосбор Лиговского канала и р. Красненькой; 2 – водосбор р. Дудергофки и Дудергофского канала с притокам

Как видно из рисунка 5.9, определённые по разным ЦМР границы водосборных бассейнов расположены достаточно близко. Результаты расчётов в среде ГИС площадей водосборных бассейнов представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Сравнение площадей водосборов, выделенных на основании модифицированной ЦМР ASTER GDEM<sup>a</sup> и авторской ЦМР, полученной с использованием топографической карты<sup>b</sup>

Водосборы	Площадь <sup>a</sup> , км <sup>2</sup>	Площадь <sup>b</sup> , км <sup>2</sup>	Различие (превышение <sup>b</sup> над <sup>a</sup> ), %
Лиговского канала и р. Красненькой	31,6	34,6	9
р. Дудергофки и Дудергофского канала	126,7	134,9	6

Таким образом, 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, полученной с использованием топографической карты.

### 5.3.5. Определение модулей стока с водосборов, на водотоках которых отсутствует мониторинг, и их внутригодовой динамики

На рисунке 5.1. представлено большое количество водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах административной границы Санкт-Петербурга, на которых отсутствуют створы мониторинга. Поступление азота и фосфора с их водосборов не учитывается при определении биогенной нагрузки на экосистемы этих акваторий. Кроме них, ещё есть прибрежные водосборы, сток с которых осуществляется непосредственно в Невскую губу и Финский залив. Чтобы определить поступление соединений азота и фосфора со всех этих водосборов, нужно знать их площади и модули стока субстанций с этих водосборов.

Площади водосборов определяются в среде ГИС (разделы 5.3.1-5.3.4 работы). Модули стока задаются на основании модулей стока соединений азота и фосфора с водосборов-аналогов, на водотоках которых выполняется

мониторинг химического состава речного стока и расходов воды. В качестве водосборов-аналогов были использованы водосборы рек Мги, Тосны, Ижоры, Оредежа, Вруды и Волчьей.

Определение водосборов-аналогов производится по сходству пространственного строения. Характеристики водосборов-аналогов должны быть наиболее близки к характеристикам исследуемых водосборов. Степень близости характеристик исследуемых водосборов к характеристикам водосборов-аналогов определялся с помощью кластерного анализа. Поэтому необходимым этапом исследования является определение пространственной структуры водосборов. В качестве источника картографической информации использованы материалы сайта ГИС-ассоциации России ([gis-lab.info](http://gis-lab.info)). Были выполнены пересечения водосборов и векторных слоёв ландшафтов и типов хозяйственного использования территорий, созданных на основе данных ГИС-ассоциации. Затем в среде ГИС были рассчитаны площади водосборных бассейнов, суммарные площади различных типов ландшафтов и зон хозяйственного использования в пределах этих бассейнов, и отношения этих площадей к общим площадям 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 используются значения густоты речной сети (отношение длины речной сети к площади водосборного бассейна), отношения площади водоёмов водосбора к его общей площади (озёрность), и средних уклонов водосборов. Для определения густоты речной сети и озёрности применялись картометрические операции с объектами векторных слоёв. Средние уклоны водосборных бассейнов определялись с помощью картометрических операций как с растровыми слоями ЦМР в пределах водосборов, так и с векторными слоями. В последнем случае в качестве подложки использовался растровый слой изображения топографической карты. Создавался слой линейных

объектов, расположенных между горизонталями карты, рассчитывались длины этих объектов, превышения высот, и далее углы наклона между горизонталями. Как среднее значение уклона водосбора использовалось среднее значение уклонов всех линейных объектов слоя. На рисунке 5.10 представлено пространственное строение исследуемых водосборов (а) и водосборов-аналогов (б).

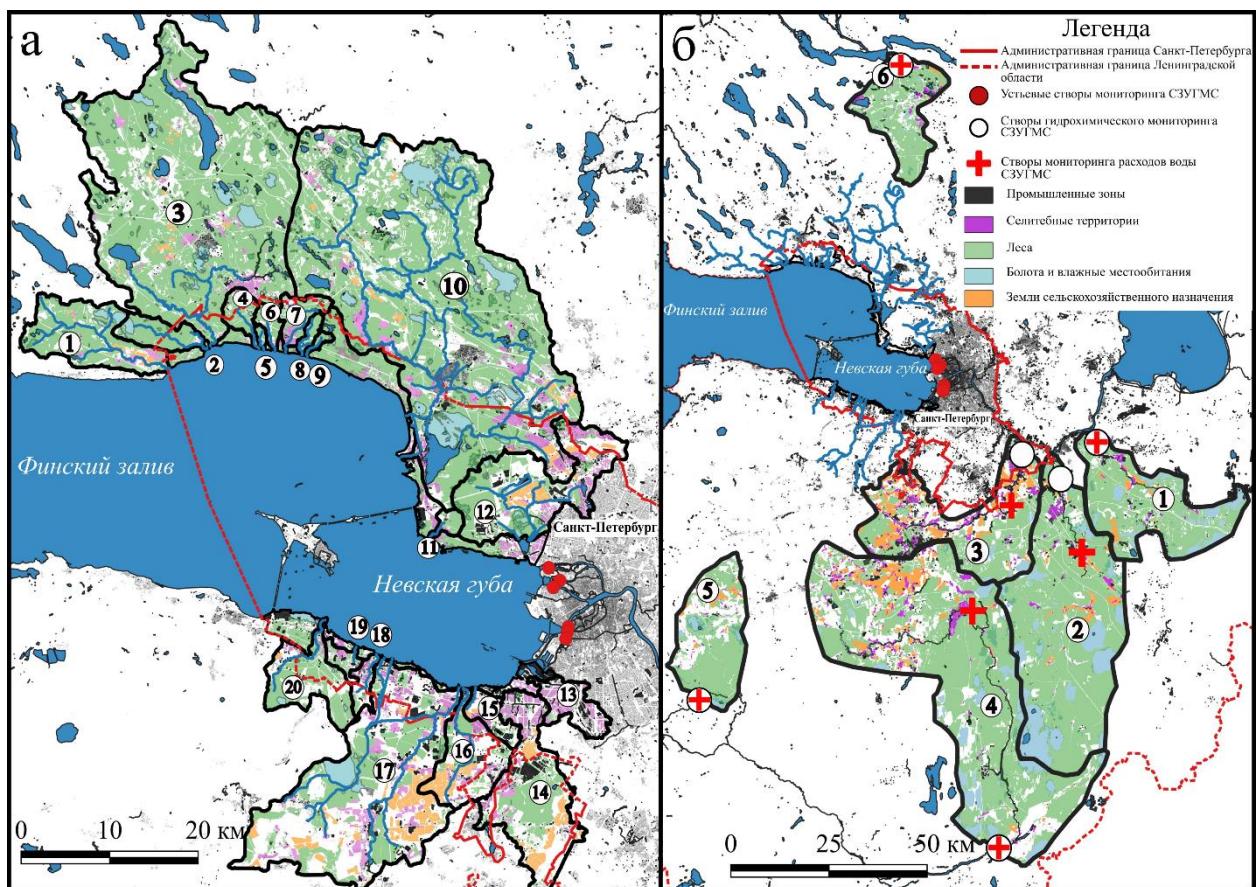


Рисунок 5.10. Пространственное строение водосборов: а) исследуемые водосборы: 1) р. Приветной, 2) Смолячкова ручья, 3) р. Чёрной, 4) Ушковского ручья, 5) Восьмого ручья, 6) р. Быстрой, 7) Зеленогорского ручья, 8) Шестого ручья, 9) Третьего ручья, 10) Сестрорецкого Разлива, 11) р. Чёрной (Лахты), 12) Лахтинского Разлива, 13) Лиговского канала и р. Красненькой, 14) р. Дудергофки и Дудергофского канала, 15) ручья Стрелка, 16) р. Кикенки, 17) рек Шингарки и Стрелки, 18) Троицкого ручья, 19) р. Кристательки, 20) р. Каасты; б) водосборы-аналоги: 1) р. Мги, 2) р. Тосны, 3) р. Ижоры, 4) р. Оредежа, 5) р. Вруды, 6) р. Волчьей

С помощью программы Statistica Statsoft был выполнен кластерный анализ с разбиением водосборов на группы (кластеры) на основании расчётов расстояний между водосборами в многомерном пространстве их характеристик. Для определение модулей стока соединений азота и фосфора с исследуемых водосборов использовались такие уровни разбиения, при которых в каждой группе водосборов присутствовали как исследуемые водосборы, так и по крайней мере один водосбор-аналог. Модули стока соединений азота и фосфора с исследуемых водосборов принимаются равными модулям стока с водосбором-аналогом данной группы водосборов. Если в группу входит более одного водосбора-аналога, то в качестве модулей стока принимаются средние значения модулей всех водосборов-аналогов этой группы.

Для определения модулей стока соединений азота и фосфора с водосборов-аналогов (р. Мги, р. Тосны, р. Ижоры, р. Оредеж, р. Вруды, р. Волчей) было выполнено исследование данных гидрохимического и гидрологического мониторинга в отделе государственного фонда данных Северо-западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Для расчетов модулей стока помимо площадей водосборов необходимы ежедневные данные о расходах воды и концентрациях соединений азота и фосфора в водотоках. Расчет производился по формуле 5.1:

$$M = \sum_{i=1}^n K \cdot (R_i \cdot C_i) / S \quad (5.1)$$

Где,  $M$  – модуль стока соединений азота и фосфора (тонн в год с  $\text{км}^2$ );  $n$  – количество дней в году;  $K$  – пересчетный коэффициент (0,0864), отношение числа секунд в сутках к числу граммов в тонне;  $R_i$  – ежедневный расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $C_i$  – концентрация субстанции ( $\text{мг}/\text{л}$ );  $S$  – площадь водосбора ( $\text{км}^2$ ).

Для вычисления модулей стока соединений азота и фосфора с водосборов-аналогов использованы результаты мониторинга, выполненного Северо-западным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗУГМС) в 1980-1989 гг. Данные по расходам воды водотоков-аналогов приводятся в ежегодниках за каждый день года. Но

значения концентраций соединений азота и фосфора в водотоках водосборов-аналогов приведены лишь для нескольких сроков в году. Поэтому для получения ежесуточных значений концентраций отдельных соединений и общего азота и фосфора была выполнена линейная интерполяция в среде компьютерной алгебры Mathcad с помощью специально разработанных программ (рабочих областей). Линейная интерполяция применялась потому, что в этом случае её результаты не выходят за пределы диапазона данных мониторинга.

Поскольку Невская губа имеет короткий период условного водообмена (около 7 суток), то необходимо определить внутригодовую динамику 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. Исходные значения расходов воды для каждого суток имеют размерность  $\text{м}^3/\text{с}$ . Эти значения пересчитывались в  $\text{м}^3/\text{сутки}$ , и умножались на концентрации соединений азота и фосфора в речном стоке. Таким образом, определялась величина стока биогенного элемента через створ мониторинга за сутки. Делением этой величины на площадь водосбора определялась величина суточного модуля стока биогенного элемента, и затем внутригодовая динамика суточного модуля в течение определённого года. Обработка ряда подобных внутригодовых динамик за ряд лет для одной и той же реки водосбора-аналога позволяет определить обобщённую внутригодовую динамику модуля стока субстанции для этой реки.

### 5.3.6. Сравнительный анализ методик расчетов поступления азота и фосфора с водосборов

В Институте озероведения РАН под руководством С.А. Кондратьева разработана модель биогенной нагрузки с российской части водосбора

Финского залива ILLM (*Institute of Limnology Load Model*) (Кондратьев, 2018). Эта модель характеризуется большой степенью универсальности и может использоваться для водосборов, отличающихся большой степенью разнообразия типов поверхности. Схема модели ILLM показана на рисунке 5.11.

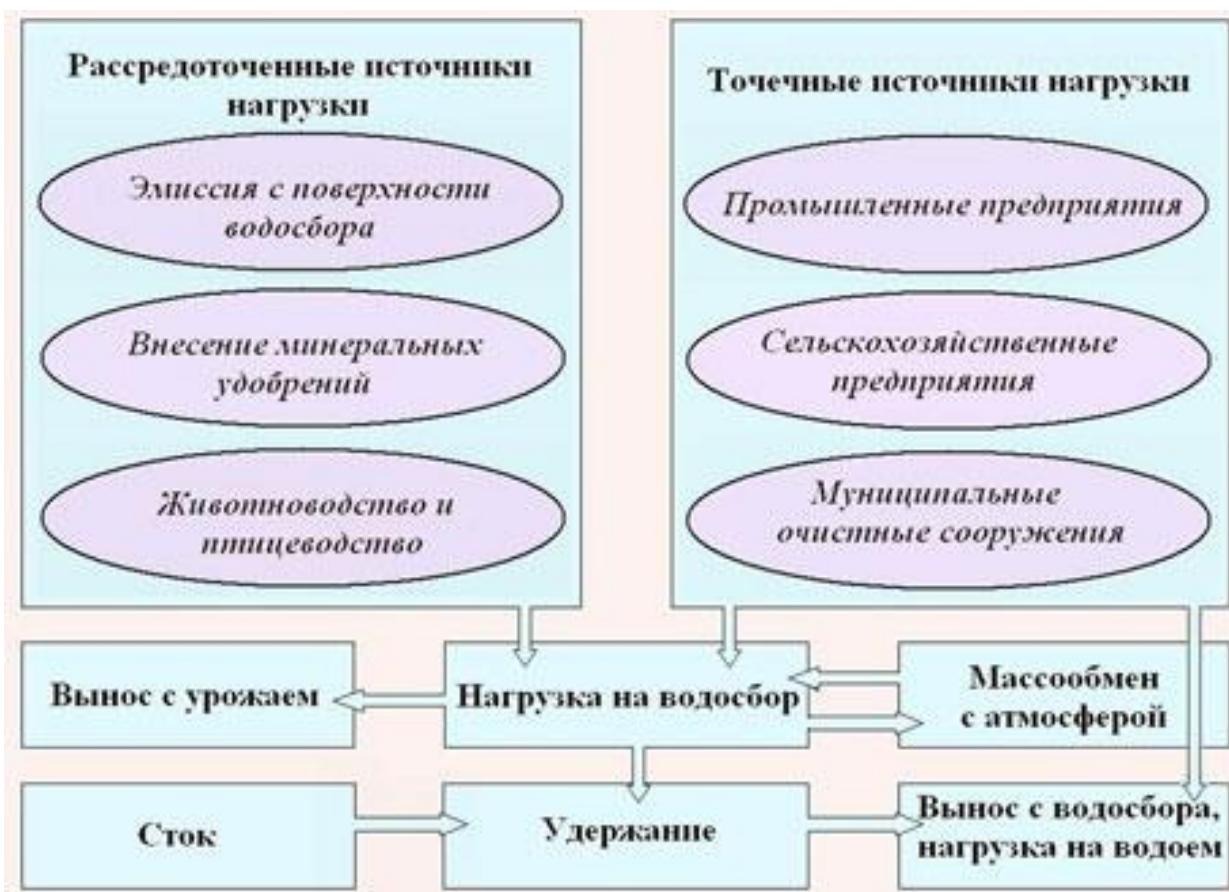


Рисунок 5.11. Схема модели ILLM (Институт озероведения РАН)

Разработанный нами подход проще используемого в ILLM. Мы использовали многолетние данные гидрологического и гидрохимического мониторинга на водотоках водосборов-аналогов. В основе применяемого нами метода лежит предположение, что модули стока соединений азота и фосфора с имеющими сходные характеристики водосборов имеют близкие значения. Объемы стока общего азота и фосфора на створах мониторинга водотоков,

частные водосборы которых выше этих створов приняты в качестве аналогов, в неявном виде уже учитывают факторы, используемые в ILLM.

Особенности похода к определению поступления общего азота и фосфора с водосборов в модели ILLM, приводятся в таблице 5.4.

Из таблицы 5.4. видно, что в ILLM присутствует очень много показателей, которые позволяют её использовать для расчётов стока общего азота и фосфора с водосборов, по водотокам которых нет никаких данных мониторинга. Многофакторность и универсальность – большое преимущество ILLM. Для определения модулей стока общего азота и фосфора с неучитываемых при мониторинге водосборов Невской губы и восточной части Финского залива был использован разработанный нами подход. При нём задаваемые в ILLM в виде коэффициентов многочисленные факторы уже неявно учитываются при применении данных гидрохимического и гидрологического мониторинга на створах водотоков водосборов-аналогов.

При этом подходе невозможно задать индивидуальные модули стока для каждого неучитываемого при мониторинге водосборного бассейна. Модуль стока с нескольких водосборов, входящих в одну группу по результатам кластерного анализа, задается одинаковым и равным модулю стока с водосбора-аналога. Для определения уникальных модулей стока субстанций с каждого неучитываемого при мониторинге водосборного бассейна необходимо увеличение числа водосборов-аналогов. Но это затруднительно из-за особенностей существующей сети мониторинга СЗУГМС.

Таблица 5.4. Особенности определения поступления общего азота и фосфора с водосборов в модели ILLM

Величина	Формула в модели ILLM и пояснение
Суммарная нагрузка с водосбора	$L = (L_c + L_{agr} + L_p + L_a) * (1 - R)$ Где, $L_c$ – годовая нагрузка от поверхностного стока (за исключением с/х территории) (в тоннах) $L_{agr}$ – годовая нагрузка от поверхностного стока с с/х территории (в тоннах) $L_p$ – годовая нагрузка от выпусков (в тоннах) $L_a$ – годовая нагрузка от атмосферного выпадения (в тоннах) $R$ – коэффициент удержания биогенных элементов водосбором (в тоннах)
$L_c$	$L_c = \sum (C_i y_i A_i / 1000)$ Где, $C_i$ – среднегодовая концентрация биогенного элемента в поверхностном стоке (мг/л) $y_i$ – слой стока (мм) $\psi_i$ – коэффициент стока для разных типов подстилающей поверхности $A_i$ – площадь того или иного типа подстилающей поверхности ( $\text{км}^2$ ) Расчет производится для каждого типа подстилающей поверхности, представленной на водосборе, за исключением с/х территории
$L_{agr}$	Для расчета используются как результаты натурных измерений по измерению содержания биогенных элементов в почве, так и эмпирические коэффициенты, отражающие степень интенсивности использования с/х угодий
$L_p$	$L_p = C_{cp} \cdot V_k / 1000$ $C_{cp}$ – средняя концентрация биогенного элемента в сточных водах в соответствии с отчетностью водопользователя $V_k$ – объем сбрасываемых сточных вод в соответствии с отчетностью водопользователя
$L_a$	Учет атмосферной составляющей биогенной нагрузки выполняется в соответствии со средними значениями на $\text{км}^2$ водосбора, приведенными в результатах исследований Института озероведения РАН. Данные имеют большой разброс значений и, в целом, С.А. Кондратьев отмечает, что атмосферная составляющая биогенной нагрузки не достаточно изучена (Кондратьев, 2018).
$R$	Расчет производится с использованием эмпирических коэффициентов и модуля стока с водосбора.
Типы поверхности водосбора	Использовались снимки Landsat-8 с пространственным разрешением 30 м/пиксель. Для уточнения результатов классификации использовались снимки Sentinel-2. Для классификации космического снимка использовалась программа ScanEx image Processor 4.2.14

В модели ILLM в качестве концентраций общего азота и фосфора в поверхностном стоке используются осреднённые значения, полученные в результате анализа публикаций, посвящённых определению концентраций общего азота и фосфора в поверхностном стоке на водосборе Финского залива (Алябина и Сорокин, 2001; Rekolainen, 1989). Такой подход обеспечивает высокую степень универсальности модели ILLM, но, вероятно, ограничивает применимость модели для условий урбанизированных водосборов. А как раз водосборы Невской губы и восточной части Финского залива в высокой степени урбанизированы. Этот факт может привести к недоучёту стока общего азота и фосфора с таких водосборов при применении ILLM. Преимуществом авторского подхода является опора на многолетние данные гидрологических и гидрохимических наблюдений СЗУГМС на створах мониторинга водотоков водосборов аналогов.

В нашем исследовании для определения типов поверхностей водосборных бассейнов были использованы векторные слои Open street map ГИС-ассоциации России (раздел 5.3.5). Эти данные находятся в свободном доступе и не требуют дополнительной обработки. В модели ILLM для решения аналогичной задачи используются спутниковые снимки Landsat-8. Эти снимки для получения сведений о площадях разных типов поверхности проходили процедуру классификации с использованием программы ScanEx Image Processor 4.2.14. Использование готовых векторных слоев пространственного строения водосборов ускоряет и упрощает процесс определения характеристик водосборов.

Ещё одним важным преимуществом разработанной нами методики является возможность её использования не только для определения поступления соединений азота и фосфора. Перечень субстанций, сток которых можно определить с неучитываемых при мониторинге водосборов с помощью авторской методики, лимитирован только перечнем исследуемых в водотоках водосборов-аналогов веществ.

Ограничения и преимущества авторской методики и использованной в модели ILLM представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5. Преимущества и ограничения применимости методик расчёта нагрузки азотом и фосфором

	Авторская методика расчёта нагрузки общим азотом и фосфором с водосборных бассейнов	Методика расчёта нагрузки общим азотом и фосфором в модели ILLM
Преимущества	Относительная простота. Использование натуральных данных. Применение свободно распространяемого программного обеспечения.	Универсальность модели. Применимость для больших водосборов с высоким разнообразием типов подстилающей поверхности на водосборе.
Ограничения	Полная «зависимость» от модулей стока субстанций с водосборов-аналогов	Использование большого количества осредненных данных, полученных по литературным источникам. Применение платного программного обеспечения.

Авторская методика расчёта поступления соединений азота и фосфора с неучитываемых при мониторинге водосборов более всего подходит для водосборов малых урбанизированных рек, а методика модели ILLM незаменима для обширных водосборов с большой степенью разнообразия условий.

В работе С.А. Кондратьева приводятся осредненные модули стока общ. азота и фосфора с водосбора вост. части Финского залива (Кондратьев, 2018). В таблице 5.6 приведено сравнение результатов расчётов модулей стока общ. азота и фосфора с неучит. при мониторинге водосборов Невской губы и вост.

части Финского залива. Также в таблице 5.6 приведены макс. допустимые модули стока общего азота и фосфора по нормам Helcom.

Таблица 5.6. Модули стока общего азота и фосфора с водосбора Невской губы и восточной части Финского залива

Водосбор	Общий азот, тонн/км <sup>2</sup> в год	Общий фосфор, тонн/км <sup>2</sup> в год	Методика расчётов
Неучитываемые при мониторинге водосборы водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга	1,113	0,066	Авторская методика
В среднем по водосбору восточной части Финского залива	0,275	0,012	ILLM (Кондратьев, 2018)
Максимально допустимое поступление в Невскую губу и восточную часть Финского залива по нормам Helcom	0,236	0,011	(Helcom, 2021)

Модули стока общего азота и фосфора с неучитываемых при мониторинге водосборов значительно превышают средние значения для водосбора восточной части Финского залива, полученные с использованием модели ILLM. Вероятно, это связано с большей степенью урбанизации водосборных бассейнов водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории Санкт-Петербурга. Важно отметить, что модули стока общего азота и фосфора, рассчитанные как с использованием модели ILLM, так и авторской методики превышают максимально допустимые значения по нормам Helcom.

### 5.3.7. Подход к оценке поступления азота и фосфора в Невскую губу с распределённым стоком с прибрежных урбанизированных территорий Санкт-Петербурга

Для оценки поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу с распределённым 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 в среде ГИС были выделены границы этих территорий (рис. 5.12)

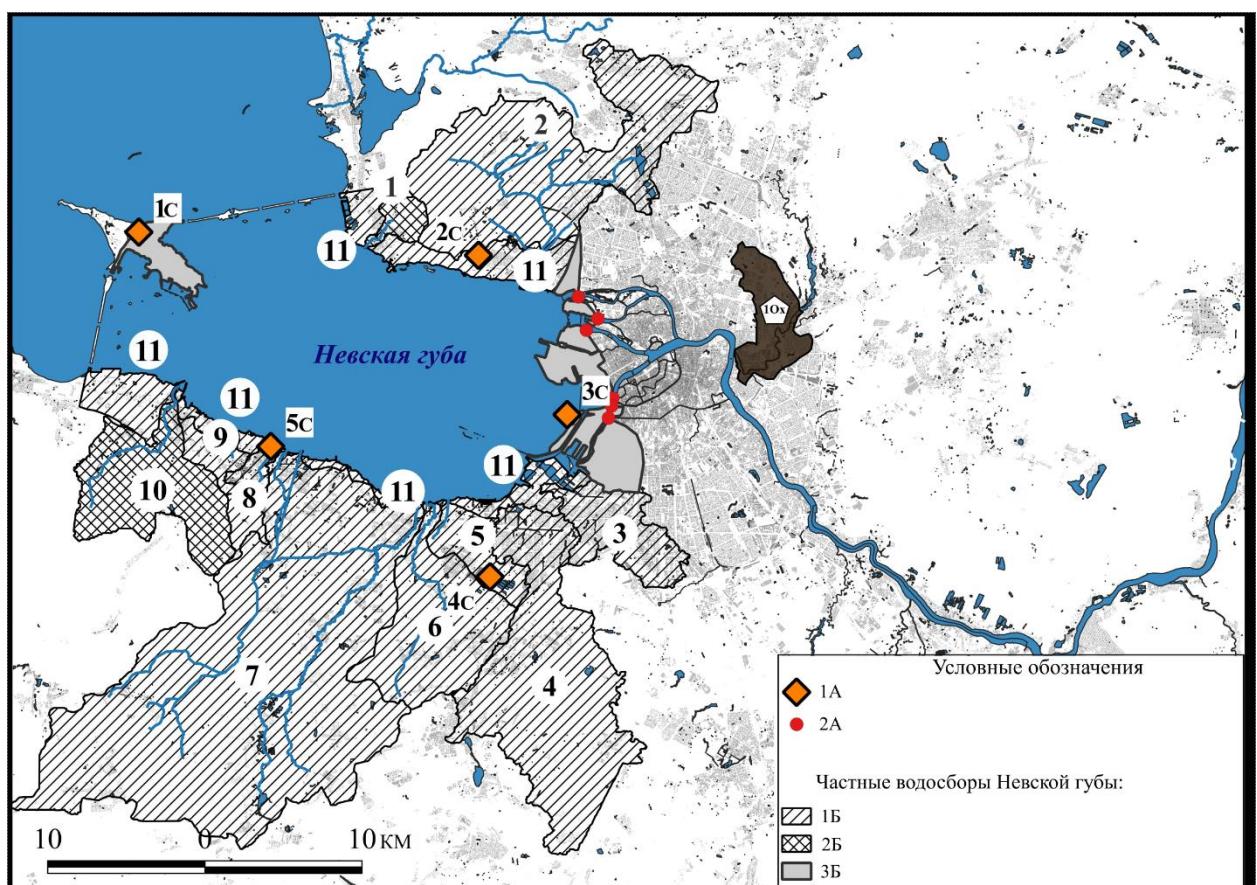


Рисунок 5.12. Расположение неучитываемых изучаемых водосборов Невской губы (1А – канализационные очистные сооружения, 2А – устьевые створы гидрохимического мониторинга СЗУГМС на Неве и её рукавах, 1Б – частные водосборы Невской губы (аналог р. Ижора), 2Б – частные водосборы Невской губы (аналог р. Тосна, Мга, Вруды, Оредеж), 3Б – примыкающие к Невской губе с востока территории Санкт-Петербурга и о. Котлин; 1Ох – частный

водосбор р. Охты ниже плотины на ул. Коммуны (аналог для определения стока соединений азота и фосфора для примыкающих к Невской губе с востока территории Санкт-Петербурга и о. Котлин (ЗБ)).

С помощью картометрических измерений в среде ГИС вычислена площадь выделенных примыкающих к Невской губе урбанизированных территорий Санкт-Петербурга. Она составила 45,4 км<sup>2</sup>.

В среде ГИС были определены типы поверхностей сильно урбанизированных водосборов на западе Санкт-Петербурга и на территории о. Котлин, с которых происходит рассредоточенный сток в Невскую губу, рассчитаны их площади и соотношения площадей. Естественно, что здесь максимум площади занимает жилая застройка (70,7%) и промышленные зоны (22,4%). Однако присутствуют участки древесной растительности (6,8%), болот и влажных местообитаний (1,3%). На о. Котлин есть даже участки сельскохозяйственных угодий (<0,1%) (таблица 5.7).

Таблица 5.7. Пространственное строение примыкающих к Невской губе с востока урбанизированных территорий Санкт-Петербурга и о. Котлин

	Площадь, км <sup>2</sup>	Доля от общ. площади, %
Леса	3,105	6,8
Болота и влажные местообитания	0,570	1,3
Сельскохозяйственные угодия	0,034	<0,1%
Селитебные территории	32,067	70,7
Промышленные зоны	10,176	22,4

Для расчёта поступления соединений азота и фосфора с примыкающих к Невской губе с востока территорий Санкт-Петербурга и о. Котлин были использованы модули стока этих субстанций с частного водосборного бассейна р. Охты ниже плотины на ул. Коммуны. Модули стока с этого водосборного бассейна были нами определены в предыдущих исследованиях (Клубов и др., 2022).

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.

Таблица 5.8. 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 угодия	0	<0,1%
Селитебные территории	75,0	70,7
Промышленные зоны	15,0	22,4

### 5.3.8. Верификация методики расчетов модулей стока субстанций

Для верификации методики определения модулей стока субстанций по данным стока с водосборов-аналогов были выполнены полевые исследования стока соединений азота и фосфора с водосборов р. Красненькой с Лиговским каналом и Дудергофского канала с Дудергофкой. Модули стока соединений азота и фосфора по результатам полевых исследований и рассчитанные по данным водосборов-аналогов были сравнены между собой.

При проведении практических занятий с обучающимися Дворца творчества «У Вознесенского моста» в 2022-2024 годах были отобраны пробы воды из реки Красненькой с моста на её пересечении с улицей Доблести и из Дудергофского канала на его пересечении с проспектом Героев (рис. 5.13). Концентрации минеральных форм азота и фосфора определялись колориметрическим методом на фотометре «Эксперт-003» и потенциометрическим методом на потенциометре «Эксперт-001». Расходы

воды измерялись в 2021-2024 годах ежеквартально с использованием метода поверхностных поплавков. Определение концентраций общего азота и фосфора выполнено с помощью регрессионных зависимостей (Третьяков, Селезнёв, 2012) на основании результатов определения минеральных форм азота и фосфора в отобранных пробах воды. Поступление общего фосфора или общего азота со стоком этих водотоков определялось по формуле 5.2 (Герман и Серебрицкий, 2023):

$$Q = 31,5 \cdot C_{ce} \cdot R_{ce} \quad (5.2),$$

где  $Q$  - поступление общего фосфора или общего азота со стоком водотоков (тонн),  $C_{ce}$  – среднегодовая концентрация общего азота или общего фосфора (мг/л),  $R_{ce}$  – среднегодовой расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

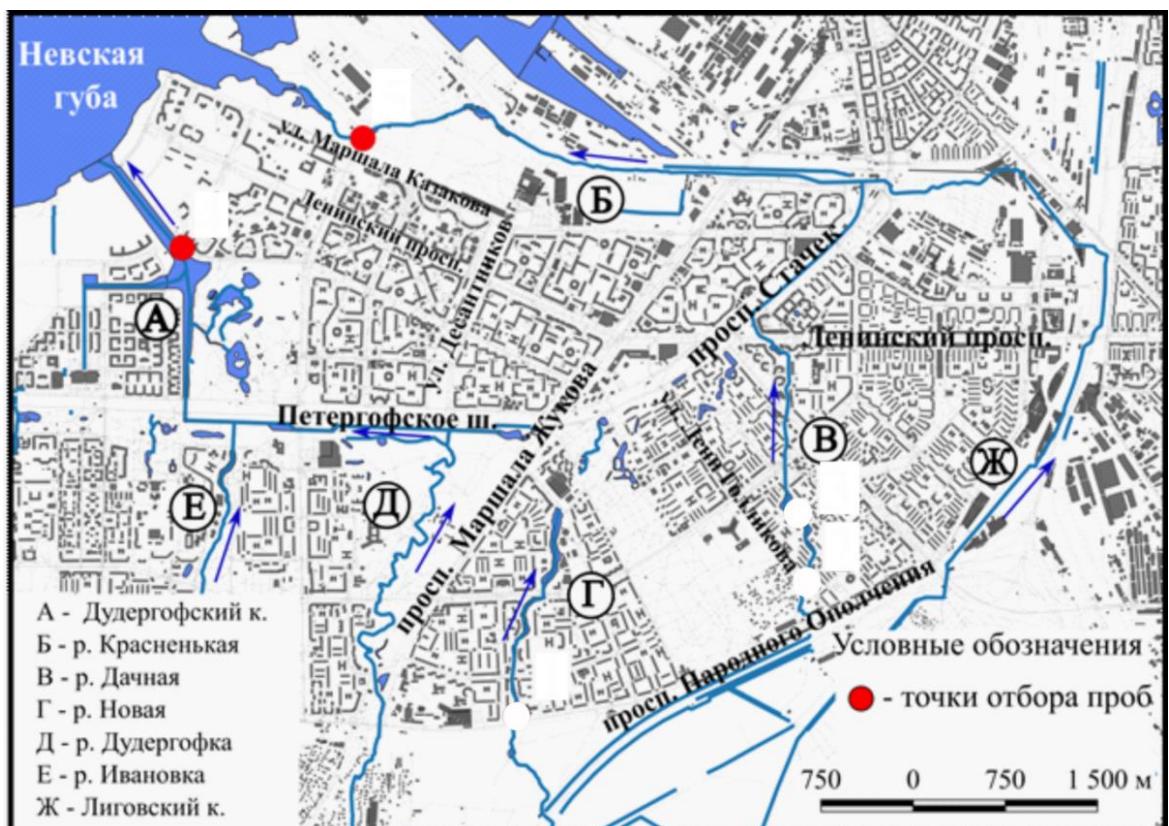


Рисунок 5.13. Точки отбора проб воды из реки Красненькой и Дудергофского канала

Для расчётов также использованы данные регулярных гидрохимических исследований ГУП «Водоканал СПб» за 2019-2021. Это предприятие осуществляет наблюдения в рамках производственного экологического

контроля в связи с осуществлением сбросов сточных вод в реку Красненькую и Дудергофский канал. В связи с изменением программы регулярных наблюдений ГУП «Водоканал СПб» предприятие больше не проводит отбор проб и определение общего азота и фосфора в реке Красненькой и Дудергофском канале.

#### 5.4. Подготовка данных для компьютерной имитации функционирования экосистемы Невской губы без учёта и с учётом поступления азота и фосфора с её частных водосборов

Компьютерная имитация функционирования экосистемы Невской губы позволяет оценить влияние дополнительного поступления соединений азота и фосфора с её частных водосборов, которые в значительной мере урбанизированы. Имитация выполнена с помощью модификации разработанной В.Ю. Третьяковым компьютерной модели EVTOX непосредственно для отражения условий Невской губы.

Сравнение результатов компьютерного имитационного моделирования функционирования экосистемы Невской губы для двух сценариев (без учета дополнительного поступления соединений азота и фосфора и с его учетом) позволяет сделать вывод о влиянии дополнительного поступления соединений азота и фосфора на эту экосистему.

Необходимым этапом исследования является подготовка адекватных данных о внутригодовой динамике поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу.

Важными параметрами используемой компьютерной модели EVTOX функционирования экосистемы проточного водоёма служат его средний объём и коэффициент проточности, а также внутригодовая динамика притока воды. Для определения обобщённой внутригодовой динамики расхода реки Невы использованы суточные значения расхода Невы на створе Новосаратовка в 1980-1989 гг. Эти данные были получены в Отделе государственного фонда

данных Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗУГМС). Далее определяется средний суммарный за год приток вод Невы в Невскую губу на основании обобщённой внутригодовой динамики расхода Невы на створе Новосаратовка и данных о расходах рек Охты, Волковки и Чёрной речки, впадающих в Неву и рукава её дельты ниже створа Новосаратовка. Коэффициент проточности Невской губы рассчитывается как частное годового притока воды в неё к её объему.

С помощью кластерного анализа частные водосборы Невской губы и водосборы-аналоги, на водотоках которых есть створы мониторинга расходов воды и химического состава вод, были подразделены на группы в соответствии с их лесистостью, долей площади болот и влажных местообитаний, озёрностью, долями сельскохозяйственных земель, селитебных территорий и промышленных зон, густотой речной сети и средними уклонами поверхности. Все эти параметры водосборных бассейнов были определены с помощью ГИС-технологий. В среде ГИС также была определена суммарная площадь каждой группы частных водосборов Невской губы.

Внутригодовая динамика суточных модулей стока с водосборов-аналогов рассчитана на основании данных мониторинга СЗУГМС на их водотоках. Площади водосборов-аналогов были определены в результате картометрических операций в ГИС (см. раздел 5.3.2). На основании внутригодовой динамики модулей стока с водосборов-аналогов рассчитывается внутригодовая динамика стока воды с частных водосборов Невской губы в соответствии с их разбиением по группам.

Следующим этапом подготовки данных является создание внутригодовых динамик компонентов модели в поступающих в Невскую губу водах. Концентрации веществ в речных водах приводятся в ежегодниках СЗУГМС не реже четырёх раз за год (поквартально). Поэтому для получения обобщённой внутригодовой динамики содержания компонентов модели в поступающем речном стоке в системе компьютерной алгебры Mathcad была проведена

интерполяция данных. На основании внутригодовых динамик отдельных лет в Microsoft Excel были получены обобщённые за ряд лет внутригодовые динамики. Данный этап обработки данных был выполнен по значениям концентраций субстанций в реке Неве. Внутригодовые динамики концентраций субстанций в стоке с частных водосборов Невской губы рассчитывались следующим образом. Умножением суточного модуля стока субстанции с данного водосбора на его площадь определяется величина стока субстанции за сутки. Умножением суточного модуля стока воды с водосбора на его площадь определяется суточный объём стока воды с водосбора. Делением суточного поступления субстанции с водосбора на суточный объём стока воды определяется средняя концентрация субстанции в стоке с водосбора в данные сутки. В расчетах учтены три группы водосборов: чьим аналогом является Ижора, чьими аналогами являются Вруда, Оредеж, Мга и Тосна (см. раздел 5.3.5); и городские сильно урбанизированные водосборы восточного побережья Невской губы и острова Котлин, водосбор-аналог — частный водосбор Охты в её нижнем течении ниже плотины Ржевского водохранилища (см. раздел 5.3.7).

Для атмосферных выпадений нормы месячных осадков были распределены по суткам. На следующем этапе получено поступление осадков на единицу площади Невской губы. С ноября по март осадки копятся в снеге, в Невскую губу не поступают. В апреле накопленные за эти месяцы осадки поступают в Невскую губу. Умножение суточного поступления воды на среднюю концентрацию субстанции в осадках даёт поступление на единицу площади акватории. Умножение этой величины на площадь Невской губы даёт суммарное поступление субстанции за сутки. Стоки очистных сооружений постоянны в течение года как по объёмам, так и по концентрациям субстанций. В расчетах учтены стоки с Северной, Центральной станций аэрации, Юго-Западных очистных сооружений, КОС Петродворца и Кронштадта.

Далее для каждого суток года рассчитывается соотношение обобщенных суточного расхода Невы, суммарного стока воды с групп частных водосборов

Невской губы, поступления с атмосферными осадками, стока очистных сооружений. На основании этого соотношения определяется вес каждого источника воды для каждого суток. Сумма весов равна 1.

Затем для каждого суток года определяются средние концентрации компонентов модели ( $C$ ) в общем стоке в Невскую губу по формуле 5.3:

$$C = (C_H \times P_H) + \sum_{i=1}^n (C_n \times P_n) + \sum_{j=1}^m (C_{wm} \times P_{wm}) + (C_p \times P_p) \quad (5.3)$$

Где  $C_H$  – концентрация в Неве,  $P_H$  – вес стока Невы,  $C_n$  – концентрация в стоке с группы частных водосборов Невской губы с номером  $n$ ,  $P_n$  – вес стока с этой группы водосборов,  $C_{wm}$  – концентрация в стоке с очистных сооружений с номером  $m$ ,  $P_{wm}$  – вес стока с очистных сооружений,  $C_p$  – концентрация в атмосферных осадках,  $P_p$  – вес атмосферных осадков.

На основании результатов этих расчётов формируются внутригодовые динамики средних концентраций субстанций компонентов модели в общем стоке в Невскую губу.

## ГЛАВА 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 6.1. Внутригодовая динамика модулей стока соединений азота и фосфора с водосборов-аналогов

Определение внутригодовой динамики модулей стока соединений азота и фосфора необходимо для расчетов поступления соединений азота и фосфора с водосборов. На рисунках 6.1 и 6.2 представлены обобщённые внутригодовые динамики суточных модулей стока общего азота и фосфора с водосборов-аналогов.

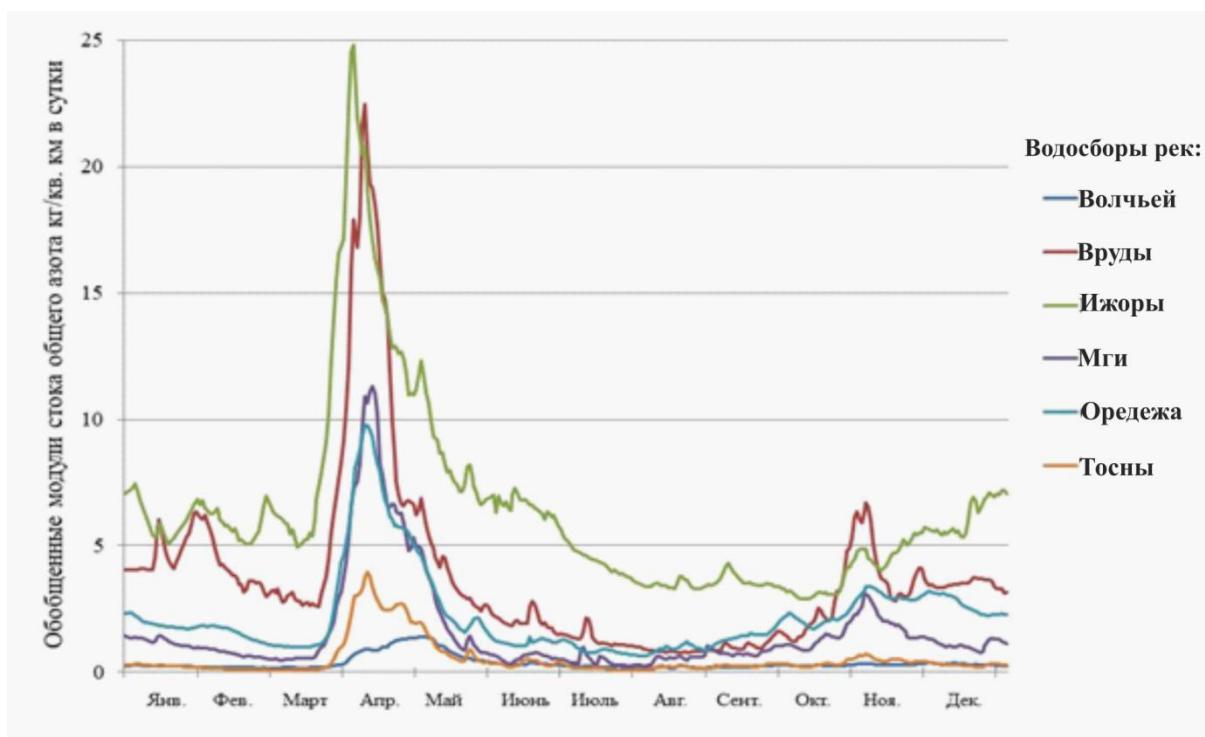


Рисунок 6.1. Внутригодовая динамика суточных модулей стока общего азота с водосборов-аналогов

Несмотря на различия внутригодовых динамик суточных модулей стока общего азота и фосфора с водосборов-аналогов, отчётливо 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 обобщённых внутригодовых динамик модулей стока с разных водосборов. Применение этого критерия показало существенные различия всех внутригодовых динамик. Только в одном случае, при сравнении обобщённых динамик стока общего азота с водосборов рек Мги и Оредежа значение критерия Нэша-Сатклиффа соответствует диапазону «существенное различие», но только немногого превышает верхнюю границу диапазона «несущественное различие».

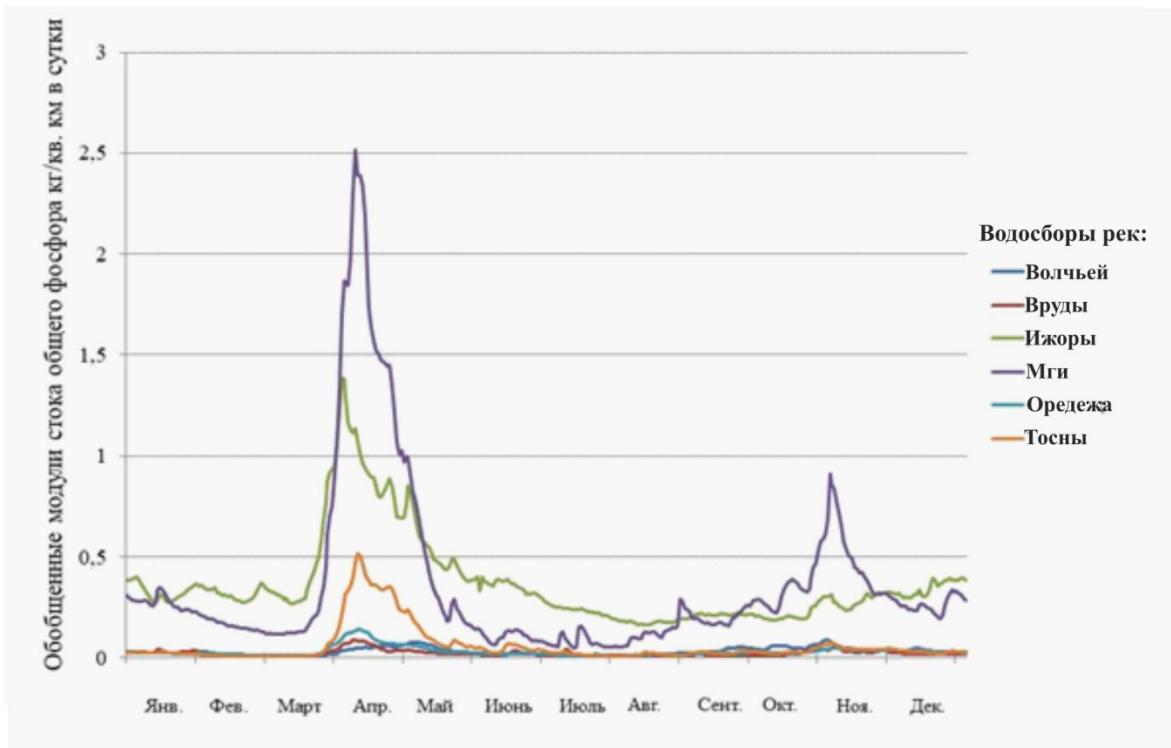


Рисунок 6.2. Внутригодовая динамика суточных модулей стока общего фосфора с водосборами-аналогов

## 6.2. Оценка модулей стока общего азота и фосфора с водосборов водотоков, на которых отсутствует мониторинг

Характеристики частных водосборов Невской губы и восточной части Финского залива, с которых в пределах Санкт-Петербурга в эти акватории поступают соединения азота и фосфора, а также водосборов-аналогов приведены в табл. 6.1 и 6.2. Результаты разбиения всех водосборов на группы с

помощью кластерного анализа в программе Statistica Statsoft представлены на рис. 6.3.

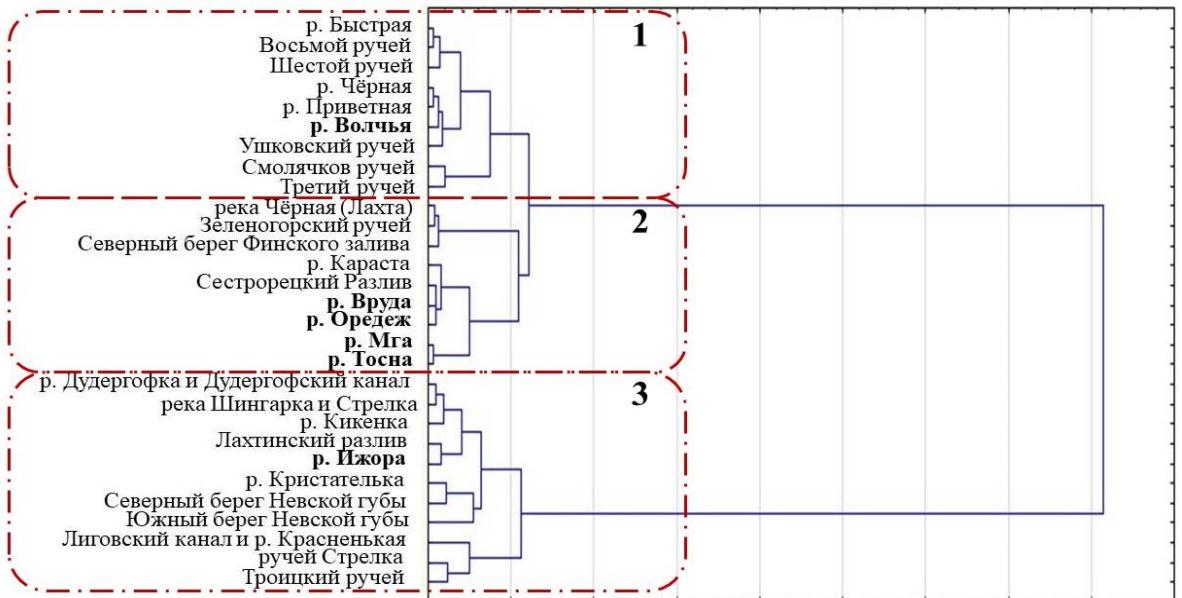


Рисунок 6.3. Результаты кластерного анализа. Жирным шрифтом выделены реки водосборов-аналогов. Показано деление на кластеры 1-3.

По результатам кластерного анализа были выделены следующие группы водосборов: 1) исследуемые водосборы – р. Быстрой, Восьмого и Шестого ручьёв, р. Чёрной и Приветной, Ушковского, Смолячкова и Третьего ручьёв, водосбор-аналог – реки Волчьей; 2) исследуемые водосборы – р. Чёрной (Лахта), Зеленогорского ручья, северного побережья Финского залива, р. Каасты, Сестрорецкого Разлива, водосборы-аналоги – р. Вруды, Оредежа, Мги и Тосны; 3) исследуемые водосборы – реки Дудергофки и Дудергофского канала, р. Шингарки и Стрелки, р. Кикенки, Лахтинского Разлива, р. Кристательки, северного и южного побережий Невской губы, Лиговского канала и р. Красненькой, ручьёв Стрелка и Троицкого, водосбор-аналог – реки Ижоры. При расчётах поступления соединений азота и фосфора с водосборов первой и третьей групп соответственно использовались модули стока с водосборов р. Волчьей и Ижоры. При расчётах поступления соединений этих биогенных элементов с водосборов рек второй группы использовались осреднённые модули стока с водосборов группы рр. Вруды, Оредежа, Мги и Тосны. Расположение водосборов разных групп представлено на рис. 6.4.

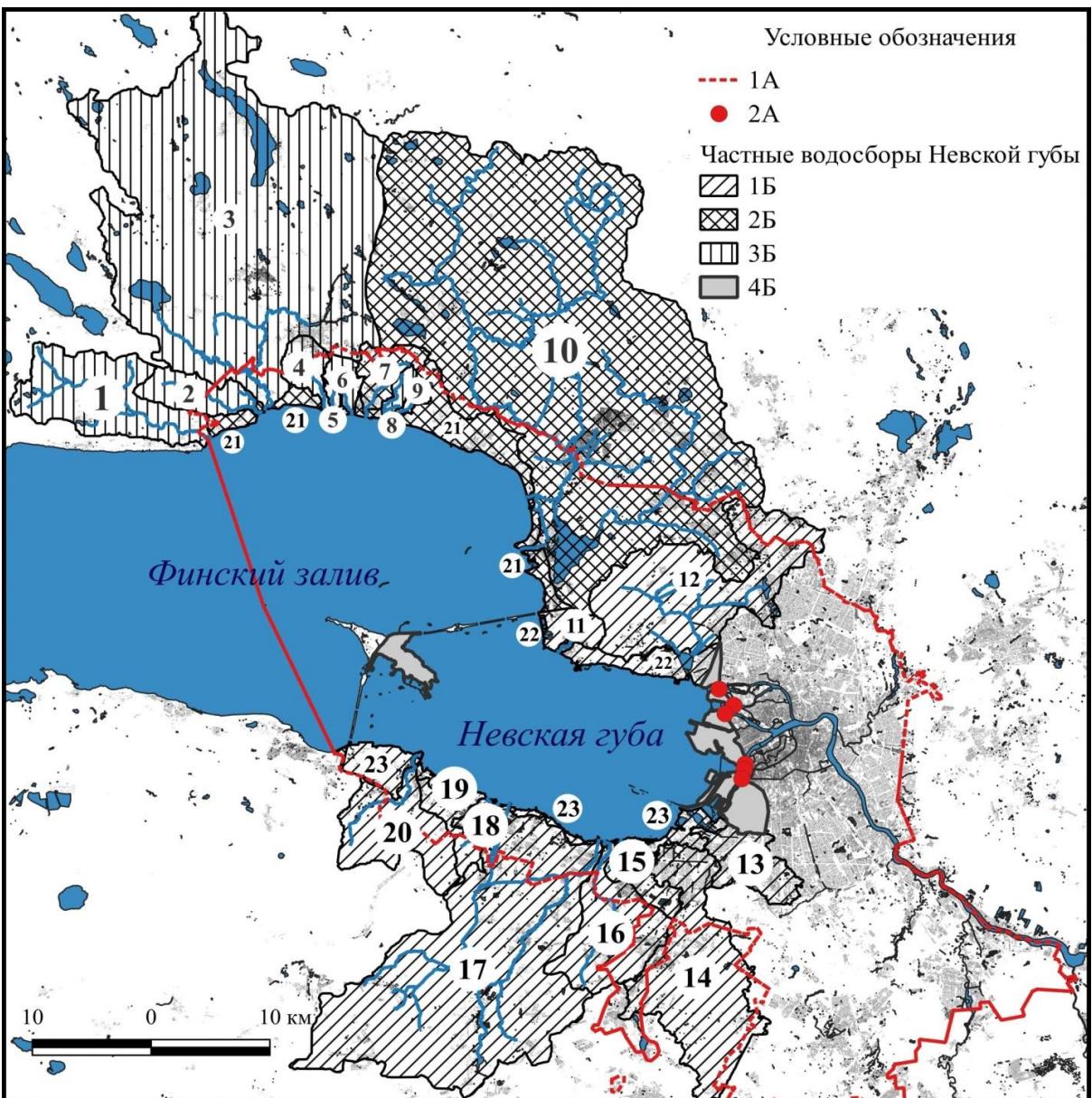


Рисунок 6.4. Расположение исследуемых водосборов Невской губы и восточной части Финского залива. Исследуемые водосборы: 1) р. Приветной, 2) Смолячкова ручья, 3) р. Чёрной, 4) Ушковского ручья, 5) Восьмого руч., 6) р. Быстрой, 7) Зеленогорского руч., 8) Шестого руч., 9) Третьего руч., 10) Сестрорецкого Разлива, 11) р. Чёрной (Лахты), 12) Лахтинского Разлива, 13) Лиговского кан. и р. Красненькой, 14) р. Дудергофки и Дудергофского кан., 15) руч. Стрелка, 16) р. Кикенки, 17) pp. Шингарки и Стрелки, 18) Троицкого руч., 19) р. Кристательки, 20) р. Карасты, 21) Области прямого стока сев. берега вост. части Финского залива, 22) Области прямого стока сев. берега Невской губы; 23) Области прямого стока южн. берега Невской губы

Условные обозначения: 1А – адм. граница СПб, 2А – устьевые створы гидрохим. мониторинга СЗУГМС на Неве и её рукавах, 1Б – частные водосборы Невской губы (аналог водосбор р. Ижоры), 2Б – частные водосборы Невской губы и вост. части Финского залива

(аналог водосбор рр. Тосны, Мги, Вруды, Оредеж), 3Б – частные водосборы восточной части Финского залива (аналог водосбор р. Волчий), 4Б – примыкающие к Невской губе с востока территории СПб и о. Котлин (аналог водосбор р. Охты).

По результатам расчётов автора водосборы-аналоги имеют следующие значения осреднённых годовых модулей стока азота и фосфора: Волчей – 130,6 кгN/км<sup>2</sup> и 11,7 кгP/км<sup>2</sup>; Вруды – 1376,1 кгN/км<sup>2</sup> и 8,8 кгP/км<sup>2</sup>; Ижоры – 2416,0 кгN/км<sup>2</sup> и 141,4 кгP/км<sup>2</sup>; Мги – 578,8 кгN/км<sup>2</sup> и 132,0 кгP/км<sup>2</sup>; Оредежа – 812,8 кгN/км<sup>2</sup> и 11,5 кгP/км<sup>2</sup>; Тосны – 186,3 кгN/км<sup>2</sup> и 21,7 кгP/км<sup>2</sup>,

Суммарная площадь исследуемых водосборов первой группы составляет 691,5 км<sup>2</sup>. Умножением её на модули стока водосбора реки Волчей получаем величины суммарного годового поступления общего азота и фосфора с водосборов этой группы, равные 90,3 тонн азота и 8,1 тонн фосфора.

Общая площадь исследуемых водосборов второй группы равна 921,9 км<sup>2</sup>. В эту группу входят 4 водосбора-аналога: рек Вруды, Оредежа, Мги и Тосны. Средние годовые модули стока общего азота и фосфора с этих водосборов составляют 738,5 кгN/км<sup>2</sup> и 43,5 кгP/км<sup>2</sup>. Соответственно с исследуемых водосборов второй группы за год поступает 680,8 тонн общего азота и 40,1 тонн общего фосфора.

Исследуемые водосборы третьей группы занимают общую площадь в 786,7 км<sup>2</sup>, и поставляют за год 1900,7 тонн общего азота и 111,2 тонн общего фосфора. Всего ориентировочное годовое поступление общего азота и фосфора с исследуемых водосборов в Невскую губу и восточную часть Финского залива составляет соответственно 2671,8 и 159,4 тонн. Средние годовые значения поступления общего азота и фосфора в Невскую губу со стоком реки Невы и её рукавов в 1979-2022 гг. составили: азот – 55092 тонн/год, фосфор – 1672 тонн/год (Герман и Серебрицкий, 2023). Таким образом, 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 азота и фосфора 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.

Таблица 6.1. Характеристики исследуемых водосборов. 1 – лесистость, 2 – доля болот и влажных местообитаний, 3 – доля с/х угодий, 4 – селитебные территории, 5 – промышленные зоны, 6 – густота речной сети ( $\text{км}^{-1}$ ), 7 - озёрность, 8 – средний уклон (градусы)

№	Водосбор	Площадь водосбора, $\text{км}^2$	Доля от площади водосбора, %					6	7	8
			1	2	3	4	5			
1	р. Приветной	83,6	68,6	5,8	3,4	4,1	<0,1	0,370	0,067	1,176
2	Смолячкова руч.	26,5	84,6	11,2	<0,1	0,2	0,1	0,686	0,110	1,051
3	р. Чёрной	544,1	68,2	5,5	0,7	2,5	0,2	0,563	0,110	1,039
4	Ушковского руч.	15,6	68,3	1,5	0,0	8,6	0,1	0,564	0,110	1,123
5	Восьмого ручья	2,6	72,9	0,3	0,0	2,7	0,0	3,252	0,003	1,360
6	р. Быстрой	9,8	75,6	0,3	0,5	3,5	0,2	1,501	0,033	1,112
7	Зеленогорского ручья	19,9	62,3	0,7	0,0	21,1	1,8	0,562	0,010	1,075
8	Шестого ручья	6,2	79,7	0,5	0,0	0,9	0,4	0,854	0,006	1,869
9	Третьего ручья	3,1	90,6	3,1	0,0	0,0	0,0	0,997	0,031	1,509
10	Сестрорецкого Разлива	766,1	60,7	9,7	1,2	4,8	0,4	0,584	0,125	0,931
11	р. Чёрной (Лахта)	7,6	61,7	0,0	0,0	17,6	0,7	0,375	0,001	0,524
12	Лахтинского Разлива	135,7	37,5	5,5	7,6	10,3	4,2	0,668	0,075	0,479
13	Лиговского канала и р. Красненькой	31,6	2,6	<0,1	0,0	27,9	14,6	0,624	0,009	0,437
14	р. Дудергофки и Дудергофского канала	126,7	27,7	0,1	10,0	10,7	4,7	1,119	0,010	3,002
15	Ручья Стрелка	19,0	11,6	0,9	6,1	16,0	5,8	0,826	0,043	0,220
16	р. Кикенки	65,4	22,5	0,5	14,8	11,3	3,1	1,150	0,016	0,640
17	Рек Шингарки и Стрелки	324,7	27,8	3,4	9,1	9,5	2,1	0,748	0,047	0,801
18	Троицкого ручья	12,7	20,3	0,9	0,5	17,3	1,3	1,203	0,016	0,755
19	р. Кристателька	10,1	38,7	0,1	0,0	16,4	6,0	0,310	0,008	0,310
20	р. Каравты	59,6	60,6	3,2	0,8	3,4	0,7	1,004	0,040	0,735
21	северного берега Финского залива	68,7	63,3	1,6	0,0	14,6	2,0	0,312	0,030	0,312
22	северного берега Невской губы	20,7	35,8	6,2	0,1	23,2	0,8	0,293	0,129	0,293
23	южного берега Невской губы	40,1	25,3	9,2	0,0	7,9	17,2	1,324	0,142	1,324

Таблица 6.2. Характеристики водосборов-аналогов. Значения колонок 1-8 как в табл. 6.1.

№	Водосбор	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Доля от площади водосбора, %					6	7	8
			1	2	3	4	5			
1	р. Мги	709,4	67,6	15,5	2,8	1,9	0,2	0,980	0,161	1,645
2	р. Тосны	1637,7	69,5	17,5	2,8	1,9	0,4	0,746	0,183	0,602
3	р. Ижоры	864,7	36,9	3,1	13,9	7,0	2,8	0,901	0,039	0,732
4	р. Оредежа	2485,8	58,4	9,9	5,2	3,1	0,3	0,543	0,110	0,957
5	р. Вруды	537,3	62,2	7,9	3,3	1,1	<0,1	0,369	0,082	0,386
6	р. Волчей	417,3	71,1	3,5	3,0	4,0	0,1	0,592	0,076	4,809

Кроме поступления с указанных выше частных водосборов Невской губы, соединения азота и фосфора также поступают в неё в составе распределенного поверхностного стока с примыкающей к Невской губе территории Приморского района Санкт-Петербурга, с территорий островов Васильевского, Декабристов, Гутуевского, Канонерского, Белого, с примыкающих к реке Екатерингофке территории Адмиралтейского и Кировского районов Санкт-Петербурга, а также с территории острова Котлин. Для расчётов этого поступления в качестве водосбора-аналога был выбран частный водосбор реки Охты в её нижнем течении ниже плотины Ржевского водохранилища на ул. Коммуны из-за высокой степени его урбанизации. Модули стока с этого водосбора были использованы для расчётов модулей стока примыкающих к Невской губе территории Санкт-Петербурга и о. Котлин. Подробная методика расчётов изложена в разделе 5.3.7 работы. Согласно результатам расчётов, за год в Невскую губу с этих территорий поступает 81,7 тонн общего азота и 36,4 тонны общего фосфора.

### 6.3. Оценка поступления общего азота и фосфора в Невскую губу со стоком с водосборов р. Красненькой с Лиговским каналом и Дудергофского канала с Дудергофкой

Для верификации методики определения модулей стока соединений азота и фосфора с использованием модулей водосборов-аналогов было проведено

полевое исследование по определению величины стока соединений азота и фосфора с водосборов р. Красненькой с Лиговским каналом и Дудергофского канала с Дудергофкой. В разделе приводятся результаты сравнения результатов расчётов модулей стока соединений азота и фосфора по данным полевых исследований и полученных с использованием водосборов-аналогов.

По результатам наших полевых исследований 2021-2024 гг. были определены концентрации соединений азота и фосфора, а также средние кратности превышения ПДК водных объектов рыбохозяйственного назначения. Результаты представлены в таблице 6.3., где в столбце «P-PO<sub>4</sub>» представлено содержание фосфора в форме фосфатов; в столбце «N-NH<sub>4</sub>» – содержание аммонийного азота; «N-NO<sub>2</sub>» – азота нитритов; «N-NO<sub>3</sub>» – азота нитратов.

**Таблица 6.3. Средняя кратность превышения ПДК для водных объектов рыбохозяйственного назначения минеральными формами азота и фосфора в 2021-2024 годах в изучаемых водных объектах**

№	Местоположение (рис. 5.13)	P-PO <sub>4</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>2</sub>	N-NO <sub>3</sub>
		ПДК <sub>рыбхоз.</sub> , мг/л	0,05	0,5	0,02
1	р. Новая (мост. пр. Народного ополчения)	7,47	22	2,2	0,43
2	р. Дачная (мост ул. Лени Голикова)	0,64	4	1,9	1
3	р. Дачная (мост западнее ул. Танкиста Хрустицкого)	0,40	3,96	1,25	2,76
4	Дудергофский канал, пересечение с пр. Героев	1,10	4,5	2,4	0,3
5	р. Красненькая, пересечение с ул. Доблести	0,86	8,6	2,76	0,16

Как видно из таблицы 6.3., наиболее загрязнена по содержанию фосфора фосфатов и аммонийной формы азота река Новая. Здесь содержание азота аммонийного превышает их предельно допустимую концентрацию для водных объектов рыбохозяйственного назначения (далее ПДК) в 22 раза. По остальным минеральным формам азота и фосфора также зафиксированы многократные превышения ПДК. Водотоки в юго-западной части Санкт-Петербурга образуют единую систему. Дудергофский канал и р. Красненькая впадают в Невскую губу (рис. 5.13). Загрязнение этих водотоков ведёт к антропогенному эвтрофированию Невской губы и Балтийского моря в целом.

По результатам кластерного анализа (рис. 6.3) водосбором-аналогом для водосборов реки Красненькой и Дудергофского канала был определен водосбор реки Ижоры. По результатам наших расчётов, водосбор реки Ижоры имеет следующие значения осреднённых годовых модулей стока азота и фосфора - 2416,0 кгN/км<sup>2</sup> и 141,4 кгP/км<sup>2</sup>. Площадь водосборного бассейна реки Красненькой (вместе с Лиговским каналом) составляет 31,6 км<sup>2</sup>, а водосбора Дудергофского канала (вместе с рекой Дудергофкой и притоками) – 126,7 км<sup>2</sup> (табл. 6.1). Перемножение усредненных годовых модулей стока общего азота и фосфора с водосбором-аналогом на площади изучаемых водосборов даёт средние величины годовых поступлений азота и фосфора в Невскую губу с этих водосборов. Для водосбора реки Красненькой эти значения составляют: 76,345 тоннN/год общего азота и 4,468 тоннР/год общего фосфора, а для водосбора Дудергофского канала – 306,000 тоннN/год общего азота и 17,915 тоннР/год общего фосфора.

Результаты оценок поступления азота и фосфора в Невскую губу со стоком реки Красненькой и Дудергофского канала по данным ГУП «Водоканал СПб» 2019-2021 гг., натурных исследований автора 2022-2024 гг. и расчётов с использованием водосборов-аналогов приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4. Поступление общего азота и фосфора со стоком реки Красненькой (А) и Дудергофского канала (Б), тонн/год, 1 – расчёты по данным ГУП «Водоканал СПб»; 2 – расчёты по данным наших натурных исследований.

В-ток	Эл-нт	2019 <sup>1</sup>	2020 <sup>1</sup>	2021 <sup>1</sup>	2022 <sup>2</sup>	2023 <sup>2</sup>	2024 <sup>2</sup>	Среднее 2019-2024 <sup>1,2</sup>	Расчет методом водосборов-аналогов
А	Общий фосфор	5,207	19,337	4,336	2,283	1,181	0,713	5,510	4,468
	Общий азот	41,421	148,976	127,007	161,737	94,675	243,059	136,146	76,345
Б	Общий фосфор	44,795	73,600	18,514	37,297	н./д.	46,922	44,226	17,915
	Общий азот	1127,940	1660,451	669,553	2235,203	747,276	1186,003	1271,071	306,000

Сравнение полученных нами оценок поступления общего азота и фосфора со стоком реки Красненькой и Дудергофского канала (табл. 6.4) с поступлением общего азота и фосфора со стоком реки Невы и её рукавов за 1979-2022 гг (Герман и 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 метода водосборов-аналогов, оказалась ниже оценки, полученной по данным натурных исследований. Возможно, на результаты повлияла небольшая продолжительность натурных исследований. Другая возможная причина различия результатов заключается в меньшей степени урбанизации водосбора реки Ижоры по сравнению с водосборными бассейнами реки Красненькой и Дудергофского канала.

#### 6.4. Обобщенная внутригодовая динамика концентраций соединений азота и фосфора в водотоках водосборов-аналогов

Для проведения компьютерного имитационного моделирования функционирования экосистемы Невской губы в качестве внешнего экологического фактора используются внутригодовые динамики содержания соединений азота и фосфора в поступающем стоке. О внутригодовой динамике содержания соединений азота и фосфора в стоке с водосборов, на которых отсутствует мониторинг, мы можем судить по аналогичным динамикам для стока с водосборов-аналогов. По результатам кластерного анализа (раздел 6.2), были выделены две группы частных водосборов Невской губы, на водотоках которых отсутствует мониторинг (рис. 6.3). Для каждой группы исследуемых водосборов по результатам кластерного анализа были определены водосборы-аналоги, на водотоках которых есть створы мониторинга. Для моделирования стока и поступления субстанций с первой группы частных водосборов Невской

губы использованы средние значения определённых нами модулей стока воды и субстанций – компонентов модели с водосборов рек Вруды, Мги, Оредежа и Тосны, а со второй группы частных водосборов – модули водосбора реки Ижоры. Водосбор реки Волчы не является аналогом для водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу. По этой причине в работе не приводятся внутригодовые динамики субстанций в стоке с этого водосбора.

Для расчётов внутригодовых динамик содержания компонентов модели в поступающем стоке используются данные мониторинга Невы и рек водосборов-аналогов. На рисунках 6.5 и 6.6 представлены обобщённые внутригодовые динамики содержания соединений азота и фосфора в водотоках водосборов-аналогов. На рисунках сплошными линиями показаны обобщённые за ряд лет внутригодовые динамики средних концентраций, а штриховыми линиями – доверительные интервалы: средние значения минус и плюс стандартное отклонение (СКО).

Внутригодовые динамики концентраций соединений азота и фосфора в водотоках водосборов-аналогов необходимы для задания концентраций этих субстанций в стоке с частных водосборов Невской губы. Эти динамики необходимы для имитации на компьютерной модели поступления в Невскую губу модели азота и фосфора с частных водосборов этой акватории, что позволяют оценить влияние этого поступления на функционирование экосистемы Невской губы.

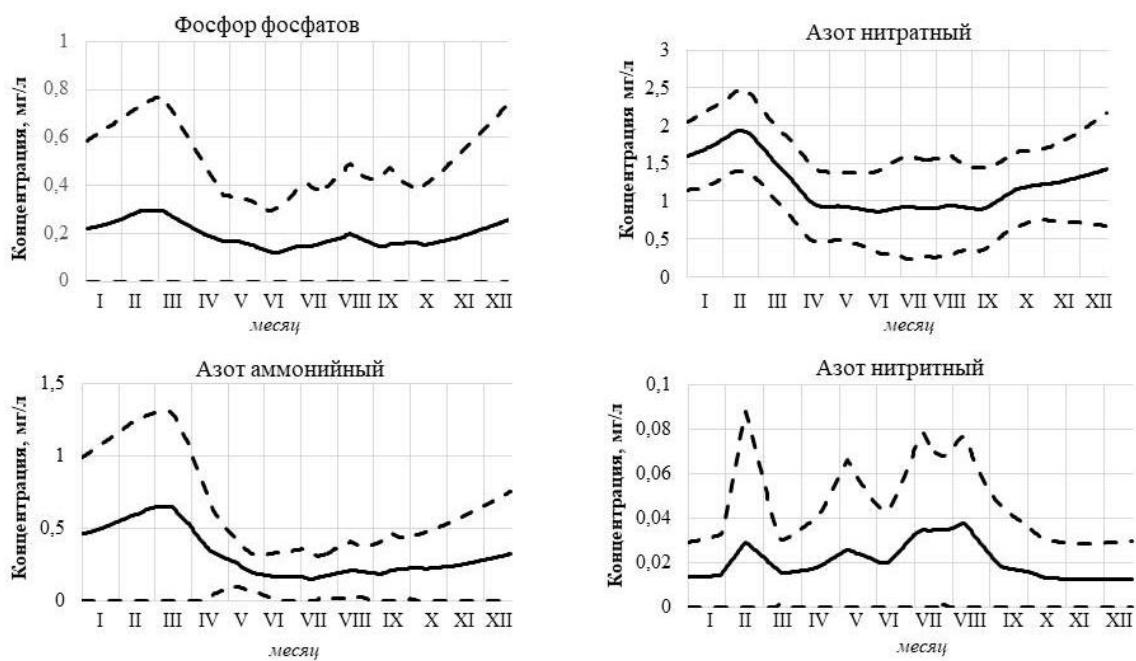


Рисунок 6.5. Обобщенная внутригодовая динамика средних концентраций соединений азота и фосфора в реках Бруда, Мга, Оредеж и Тосна.

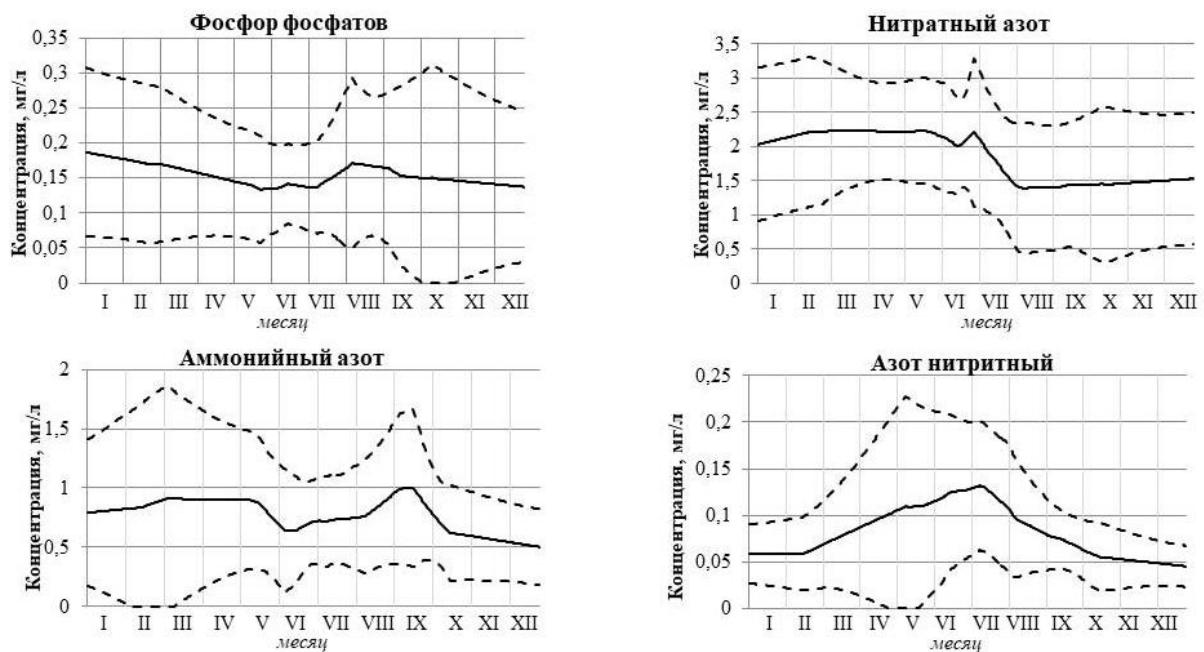


Рисунок 6.6. Обобщенная внутригодовая динамика концентраций соединений азота и фосфора в реке Ижоре.

## 6.5. Внутригодовая динамика поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу с водами реки Невы и с частных водосборов Невской губы

На рисунке 6.7 представлены внутригодовые динамики поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу со стоком реки Невы и с неучитываемых при мониторинге водосборов. Расчет внутригодовых динамик производился с использованием многолетних данных гидрохимического и гидрологического мониторинга СЗУГМС (раздел 5.4. работы). Весенние пики поступления веществ со стоком реки Невы и с водосбора Невской губы совпадают. Важно отметить, что для реки Невы (рис. 6.7., А) характерен ещё осенний пик в октябре-ноябре, связанный с паводками в это время. Во второй половине осени часто преобладает циклонический тип погоды, ветры западных направлений и длительные осадки в виде дождя и мокрого снега. Эти факторы приводят к повышению расхода воды в реке Неве и, как следствие, поступления соединений азота и фосфора. В динамике стока соединений азота и фосфора с водосборов неучитываемых при мониторинге водотоков (рис. 6.7., Б) осенью не наблюдается максимумов. Для реки Невы минимальный сток минерального фосфора отмечен летом (июль-август) (рис. 6.7., А), а для минерального азота минимум отмечается зимой (декабрь-январь) (рис. 6.7., А). Возможно, это связано с тем, что фито- и бактериопланктон летом потребляют минеральный фосфор быстрее, чем он поступает в водные объекты. Минимальный сток минерального азота зимой, вероятно, связан с подземным питанием водотоков. Поступление минерального азота и фосфора с водосборов неучитываемых при мониторинге водотоков в течение года за исключением весенних пиков находится приблизительно на одинаковом уровне (рис. 6.7., Б).

Из таблицы 6.5 видно, что средняя доля годового поступления воды в Невскую губу со стоком реки Невы составляет более 99 % от общего поступления воды в акваторию, т.е. абсолютное большинство объёма воды в Невской губе – это по происхождению невская вода. А доля вод, поступивших с неучитываемых при мониторинге водосборов очень мала.



Рисунок 6.7. Внутригодовая динамика поступления соединений азота и фосфора в Невскую губу со стоком реки Невы и с неучитываемых водосборов.

Таблица 6.5. Среднегодовой приток воды в Невскую губу с неучитываемых при мониторинге водосборов и со стоком р. Невы

	Среднегодовой сток воды, км <sup>3</sup>
Неучитываемые водосборы	0,502
р. Нева	81,824

Другое соотношение наблюдается для концентраций форм азота и фосфора в Неве и в стоке с неучитываемых при мониторинге водосборов. 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 водосборов Невской губы превышает таковую в стоке Невы в среднем почти в 20 раз, а минерального азота – почти в 8 раз (табл. 6.6). 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 6.6. Среднегодовые концентрации соединений 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 учётом весов стока вод Невы, стока воды с неучитываемых при мониторинге водосборов, сбросов очистных сооружений и атмосферных выпадений по формуле 5.3 (см. раздел 5.4). С учетом соотношения стока воды с неучитываемых водосборов и реки Невы (табл. 6.5), вес неучитываемых водосборов в итоговой концентрации соединений азота и фосфора в стоке в Невскую губу незначителен.

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.

## 6.6. Влияние урбанизации на поступление азота и фосфора в Невскую губу с неучитываемых при мониторинге водосборов

Урбанизация оказывает значительное влияние на функционирование экосистем, в том числе изменяя потоки вещества. Для выявления влияния урбанизации частного водосборного бассейна Невской губы на функционирование её экосистемы было рассчитано фоновое поступление с

неучитываемых при мониторинге водосборов Невской губы в предположении отсутствия на них урбанизации и сельскохозяйственного использования (таблица 6.7.).

Таблица 6.7. 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	55,311	4,174	(Осипов и др., 2020)
Расчётное среднегодовое современное поступление, тонн/год	1946,526	98,346	Расчёты автора
Превышение современного поступления над фоновым, разы	35,19	23,57	

В таблице 6.7. представлены результаты такого расчёта. Были использованы модули стока, приведенные в работе Осипова А. Г., Осипова Г. К. и Ковязина В.Ф. (Осипов и др., 2020). Модули годового фонового стока были умножены на площадь неучитываемого при мониторинге частного водосборного бассейна Невской губы. Годовое поступление общего азота и фосфора с неучитываемых при мониторинге водосборов Невской губы при современном уровне их урбанизации и хозяйственного освоения было рассчитано с использованием модулей стока минеральных форм азота и фосфора, полученных по результатам расчетов автора. Модули стока минеральных форм азота и фосфора были пересчитаны с использованием регрессионных зависимостей (Третьяков, Селезнев, 2012) в модули стока общего азота и фосфора с неучитываемых при мониторинге водосборов. Перемножением модулей стока на площадь было получено суммарное за год поступление с неучитываемых при мониторинге водосборов. Как показано в таблице 6.7, 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.

## 6.7. Поступление азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива от очистных сооружений

Как было показано в разделе 3.1, сейчас в Санкт-Петербурге 99,7 % хозяйство-бытовых стоков проходит очистку на очистных сооружениях. Но полностью очистить сточные воды от азота и фосфора невозможно. Часть соединений этих элементов поступает в водные объекты Санкт-Петербурга с очищенными сточными водами. Большинство очистных сооружений Санкт-Петербурга сбрасывают сточные воды в Невскую губу и восточную часть Финского залива. Это:

1. Центральная станция аэрации (ЦСА),
2. Северная станция аэрации (ССА),
3. Юго-западные очистные сооружения (ЮЗОС),
4. Канализационные очистные сооружения (КОС) Петродворцового района,
5. КОС г. Кронштадта,
6. КОС г. Сестрорецка,
7. КОС г. Зеленогорска,
8. КОС п. Репино,
9. КОС п. Молодежное.

Расположение очистных сооружений, сбрасывающих сточные воды в Невскую губу и восточную часть Финского залива показано на рисунке 6.8.

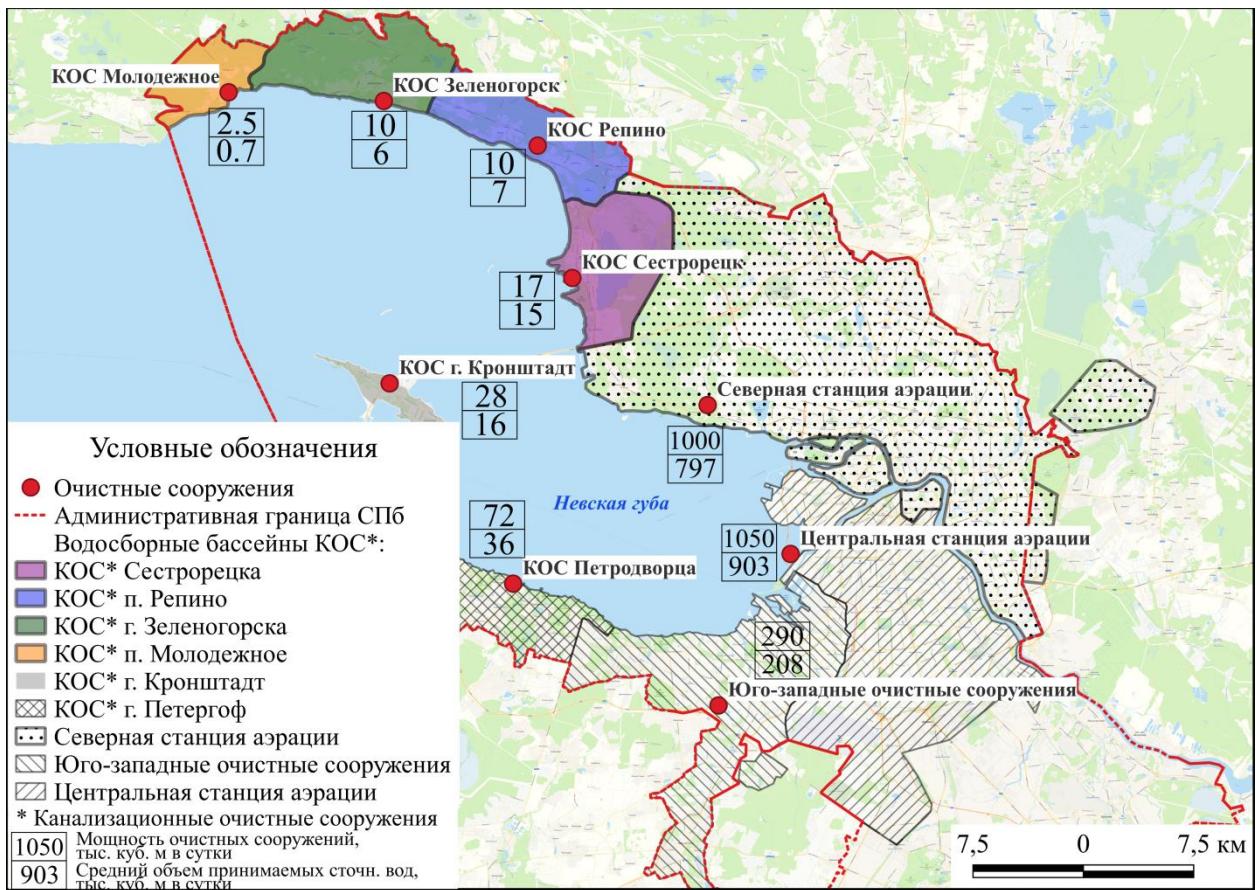


Рисунок 6.8. Расположение очистных сооружений, сбрасывающие сточные воды в Невскую губу и восточную часть Финского залива

Из рисунка видно, что большая часть (96 %) сточных вод Санкт-Петербурга поступает на три очистных сооружения:

- Центральная станция аэрации (ЦСА),
- Северная станция аэрации (ССА),
- Юго-западные очистные сооружения (ЮЗОС).

Также из рисунка видно, что у очистных сооружений есть запас мощности, и они готовы к приёму дополнительного количества сточных вод без необходимости осуществления аварийных сбросов, при которых сточные воды могут поступать в водные объекты без очистки.

Со стоком этих трёх самых мощных очистных сооружений Санкт-Петербурга в акватории Невской губы и восточной части Финского залива поступает больше всего общего азота и фосфора. Объёмы поступления этих

субстанций от всех очистных сооружений Санкт-Петербурга представлены в таблице 6.8.

Таблица 6.8. Поступление общего азота и фосфора со сточными водами в Невскую губу и восточную часть Финского залива (расчеты по данным ГУП «Водоканал СПб»)

Название очистных сооружений	Мощность в 2024 году	Средний за пять лет объем принимаемых сточных вод	Поступление в год со сточными водами после очистки	
			Азот общий	Фосфор общий
	тыс. куб. м сутки	тыс. куб. м сутки	тонн/год	тонн/год
ЦСА	1050	902,72	3054,40	365,74
CCA	1000	797,02	2763,67	119,27
ЮЗОС	290	208,05	577,13	18,98
КОС г. Петергоф	72	36,07	121,12	12,64
КОС г. Кронштадт	28	16,42	49,74	2,64
КОС г. Сестрорецка	17	15,07	55,01	4,18
КОС г. Зеленогорска	10	5,88	23,82	0,49
КОС п. Репино	10	6,58	13,93	0,96
КОС пос. Молодежное	2,5	0,65	нет данных	нет данных

Из таблицы 6.8 видно, 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.

## 6.8. Особенности поступления азота и фосфора в Невскую губу

Поступление соединений азота и фосфора в Невскую губу происходит от следующих источников:

1. Со стоком реки Невы и её рукавов,
2. С очищенными сточными водами,
3. В составе стока с неучитываемых при мониторинге частных водосборов Невской губы,
4. С распределённым стоком с водосборных бассейнов Санкт-Петербурга (часть Приморского района, западная часть Васильевского острова и острова Декабристов, примыкающие к реке Екатерингофке и акватории Торгового порта части Адмиралтейского и Кировского районов Санкт-Петербурга)
5. С атмосферными осадками.

Поступление общего азота и фосфора в Невскую губу со стоком реки Невы и её рукавов приводятся в ежегодниках Комитета по природопользованию (Герман и Серебрицкий, 2023).

Оценка поступления общего азота и фосфора в Невскую губу со сбросом очистных сооружений Санкт-Петербурга приведена в разделе 6.7 работы. Расположение очистных сооружений, осуществляющих сбросы в Невскую губу, и годовые объёмы сбросов показаны на рисунках 6.8 и 6.9.

Результаты оценки поступления общего азота и фосфора в Невскую губу в составе стока с неучитываемых при мониторинге частных водосборов подробно описаны в разделе 6.2 работы. Оценка основана на использовании метода водосборов-аналогов и опирается на данные ежегодного мониторинга химического состава и расхода воды водотоков водосборов-аналогов Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗУГМС).

Масса ежегодно поступающего общего азота и фосфора с распределенным стоком с водосборных бассейнов Санкт-Петербурга (часть Приморского района, западная часть Васильевского острова и острова Декабристов, примыкающие к реке Екатерингофке и акватории Торгового порта части Адмиралтейского и Кировского районов Санкт-Петербурга) приведена в разделе 6.2 работы. Оценка основана на предположении, что модуль стока с этих водосборных бассейнов аналогичен стоку с частного водосбора р. Охты (ниже плотины на ул. Коммуны). Эти водосборы близки по пространственному строению. Подробное описание методики расчета приведено в разделе 6.2 работы.

Оценка поступления общего азота и фосфора с атмосферными выпадениями производилась с опорой на данные: исследований коллег, СЗУГМС и собственные исследования химического состава атмосферных выпадений в Санкт-Петербурге. Результаты оценки приведены в разделе 3.5 работы.



Рисунок 6.9. Поступление общего азота и фосфора в Невскую губу с очищенными сточными водами

Поступление общего азота и фосфора в Невскую губу от различных источников показано в таблице 6.9.

Таблица 6.9. Поступление общего азота и фосфора в Невскую губу

	Азот общий тонн/год	Фосфор общий тонн/год
Нева и её рукава 2006-2020	50995,53	1203,40
Очистные сооружения	6566,06	519,27
Неучитываемые частные водосборы	1864,86	92,28
Примык. к Невской губе с востока территории СПб, и о. Котлин	81,67	6,08
Атмосферное выпадение	364,71	36,47

Видно, что больше всего азота и фосфора поступает в Невскую губу со стоком реки Невы и её рукавов, а также с очищенными сточными водами. Приток общего азота и фосфора с неучитываемых частных водосборов и с атмосферными осадками составляет малую часть в сравнении с другими источниками. Соотношение поступления общего азота и фосфора в Невскую губу от перечисленных в таблице 6.9 источников показано на рисунках 6.10 и 6.11.

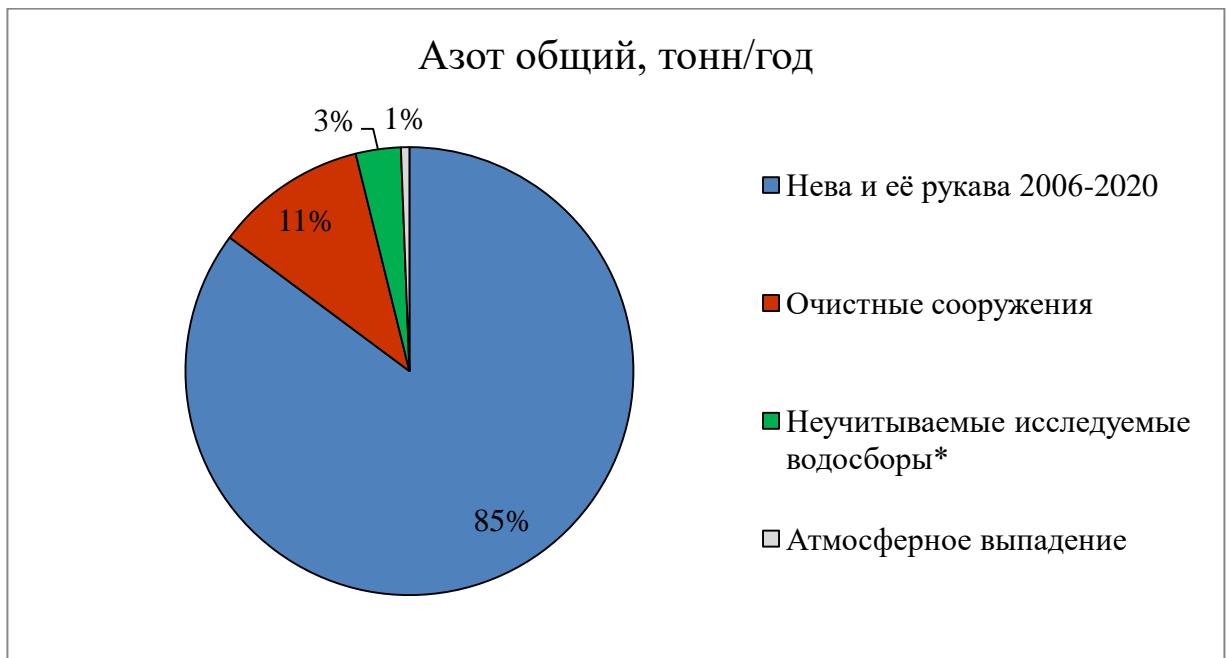


Рисунок 6.10. Соотношение поступления общего азота в Невскую губу от разных источников (\* включая поступление от примыкающих к Невской губе с востока территорий Санкт-Петербурга и о. Котлин)



Рисунок 6.11. Соотношение поступления общего фосфора в Невскую губу от разных источников (\* включая поступление от примыкающих к Невской губе с востока территорий Санкт-Петербурга и о. Котлин)

В среднем поступление общего азота со стоком реки Невы и её рукавов составляет 85 % от суммарного поступления от всех источников, общего фосфора – 65 %. С очищенными сточными водами в Невскую губу поступает 11 % общего азота и 28 % – общего фосфора. С неучитываемых при мониторинге частных водосборов и атмосферными осадками поступает не более 4 % общего азота и около 7 % фосфора. Несмотря на малую долю поступления в Невскую губу азота и фосфора с неучитываемых при мониторинге её частных водосборов и в составе атмосферных осадков, эти источники необходимо учитывать при планировании мероприятий по охране экосистем Балтийского моря от антропогенного эвтрофирования.

## 6.9. Особенности поступления соединений азота и фосфора в восточную часть Финского залива в границах Санкт-Петербурга

Для оценки функционирования Невской губы с учетом и без учета дополнительного поступления соединений азота и фосфора используется компьютерная модель функционирования экосистемы проточного водоёма, разработанная В.Ю. Третьяковым. Поступление азота и фосфора в Невскую губу из восточной части Финского залива может стать внешним экологическим фактором для функционирования экосистемы Невской губы. Дополнительное поступление соединений азота и фосфора из восточной части Финского залива можно рассматривать как внешний экологический фактор для экосистемы Невской губы только если концентрации соединений азота и фосфора в акватории западнее Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений будут выше, чем в акватории восточнее него.

Восточная часть Финского залива в границах Санкт-Петербурга расположена западнее Невской губы и восточнее глубоководной части Финского залива. В ежегодниках СЗУГМС эта часть Финского залива называется мелководной. СЗУГМС проводит регулярные наблюдения за гидрохимическим составом Невской губы и восточной части Финского залива. Расположение точек мониторинга показано на рисунке 6.12.

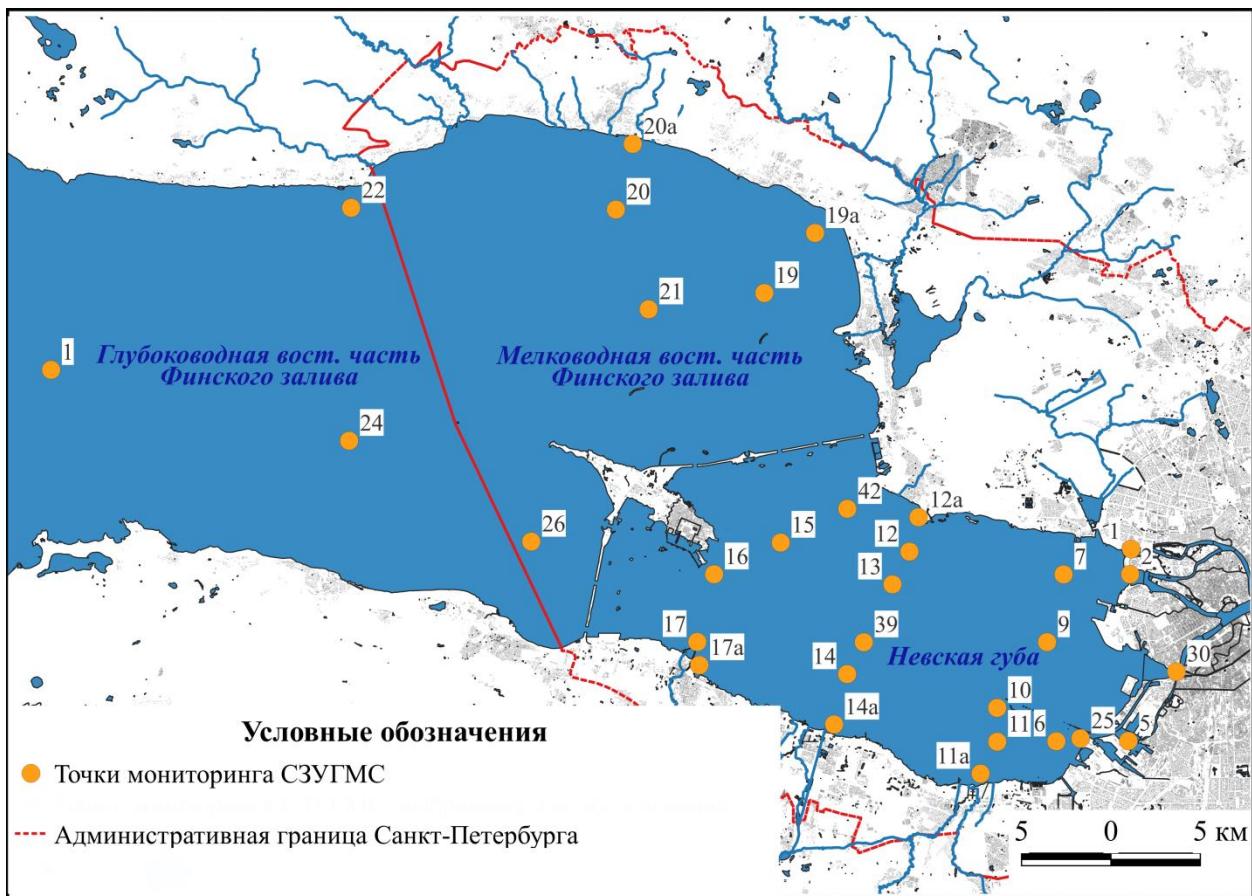


Рисунок 6.12. Расположение станций гидрохимического мониторинга Невской губы и восточной части Финского залива СЗУГМС

В Невской губе поток воды постоянно направлен на запад, разумеется, за исключением кратковременных периодов прихода с запада нагонной волны. Существует почти постоянное поступление вод Невской губы в восточную мелководную часть Финского залива, также за исключением периодов наводнений. Но возможно и поступление вод с запада, из глубоководной части Финского залива. Если концентрации соединений азота и фосфора в глубоководной части Финского залива меньше, чем в его мелководной части, то их поступление не усиливает эвтрофирование экосистемы восточной части Финского залива. Наоборот, в этом случае происходит снижение концентраций азота и фосфора в водах мелководного района Финского залива. Были проанализированы данные о среднегодовых концентрациях соединений азота и фосфора в водах акваторий Невской губы, мелководного и глубоководного

районов Финского залива. Доступ к данным был получен в отделе государственного фонда данных СЗУГМС. Были проанализированы данные за период 2006-2020 гг. Результаты анализа приводятся в таблице 6.10.

Таблица 6.10. Среднегодовые концентрации соединений азота и фосфора в Невской губе и Финском заливе\* по данным ежегодников СЗУГМС 2006-2020 гг.

Субстанция	Глубоководная часть*	Мелководная часть*	Невская губа
Азот аммонийный	0,028	0,049	0,076
Азот нитритный	0,004	0,008	0,011
Азот нитратный	0,057	0,183	0,239
Азот общий	0,497	0,678	0,768
Фосфор фосфатов	0,009	0,010	0,016
Фосфор общий	0,018	0,018	0,020

Из таблицы 6.10 следует, что концентрации азота и фосфора в глубоководной восточной части Финского залива не превышают аналогичные значения в его мелководной части. Следовательно, при оценке опасности эвтрофирования экосистемы примыкающей к Курортному району Санкт-Петербурга мелководной акватории нет необходимости в учёте поступления сюда соединений азота и фосфора из глубоководной части залива. В Невской губе средние концентрации соединений азота и фосфора выше, чем в мелководной восточной части Финского залива. Данные из таблицы 6.10 показывают, что поступление соединений азота и фосфора из Невской губы в восточную часть Финского залива весьма существенно.

Из таблицы 6.10 следует, что наиболее высокие значения концентраций соединений азота и фосфора наблюдаются в Невской губе. Из распределения значений концентраций можно сделать вывод, что отсутствует необходимость учёта 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 соединений азота и фосфора в мелководную часть Финского залива происходит от следующих источников:

- Со стоком из Невской губы,
- Со стоками очистных сооружений,
- Со стоком с водосборов неучитываемых при мониторинге водотоков,
- С атмосферными осадками.

Объём Невской губы составляет около 1 км<sup>3</sup>, период условного водообмена и времени водообмена – 7 суток (Нежиховский, 1981). Поэтому ежедневно из Невской губы в мелководную восточную часть Финского залива через Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений поступает около 0,143 км<sup>3</sup> воды. Перемножение среднегодовых концентраций соединений азота и фосфора в Невской губе (таблица 29) на эту величину даёт суточные потоки азота и фосфора, поступающие в восточную мелководную часть Финского залива. Умножением средних суточных потоков азота и фосфора на количество дней в году получаем среднегодовое поступление субстанций из Невской губы в восточную часть Финского залива.

В восточную мелководную часть Финского залива сбрасывают сточные воды 4 очистные сооружения ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»:

- КОС г. Сестрорецка,
- КОС г. Зеленогорска,
- КОС п. Репино,
- КОС п. Молодёжное.

Среднегодовые количества сбрасываемых очистными сооружениями в восточную часть Финского залива соединений азота и фосфора представлены в таблице 1 (раздел 6.7 работы).

Методика расчётов поступления соединений азота и фосфора на акватории Невской губы и восточной части Финского залива с атмосферными осадками представлены в разделе 3.5 работы.

Поступление общего азота и фосфора в восточную мелководную часть Финского залива от разных источников представлено в таблице 30.

Таблица 6.11. Поступление общего азота и фосфора в восточную мелководную часть Финского залива

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

#### 6.10. Особенности баланса азота и фосфора Невской губы

Важно отметить разницу 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 (таблица 6.12).

Таблица 6.12. Поступление общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную мелководную часть Финского залива

	Азот общий	Фосфор общий
	тонн/год	тонн/год
Суммарный приток в Невскую губу от всех источников	59872,83	1857,50
Поступление в восточную мелководную часть из Невской губы	40045,71	1042,86

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. Эти субстанции далее по пищевой цепочке поступают в зоопланктон.

Отмерший планктон, отбросы пищи, фекалии организмов поступают в детрит. Фито-, бактериопланктон и детрит в результате гравитационного осаждения опускаются на дно и формируют органическую фракцию донных отложений. Таким образом, часть запасов азота и фосфора водной толщи аккумулируется в донных отложениях и изымается из биогеохимического круговорота и транзитного переноса в восточную часть Финского залива. Разумеется, часть захороненного азота и фосфора может затем возвратиться в водную толщу при ветро-волновом взмучивании донных осадков.

Все описанные потоки поступления общего азота и фосфора в Невскую губу и восточную мелководную часть Финского залива показаны на рисунке 6.13.

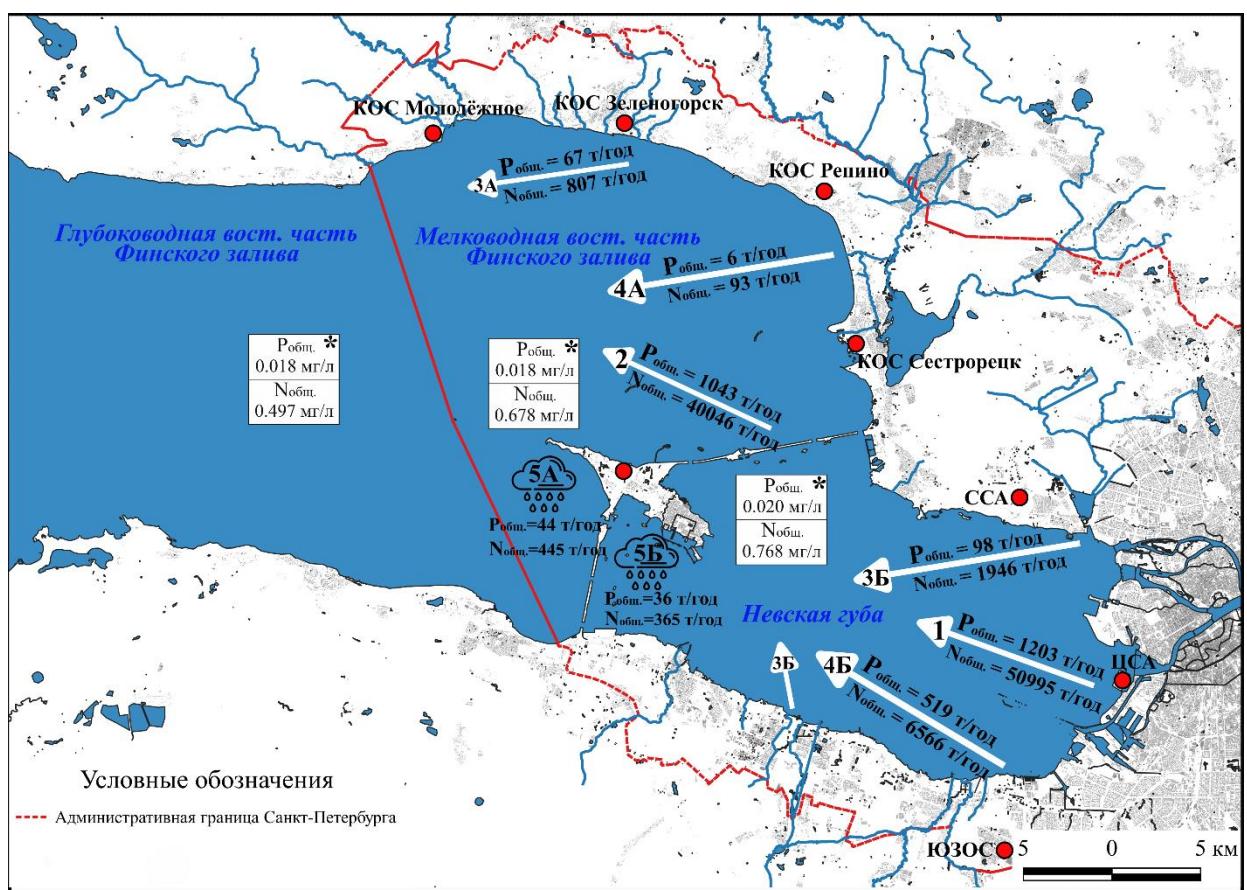


Рисунок 6.13. Потоки общего азота и фосфора в Невской губе и восточной части Финского залива

На рисунке 6.13 приняты следующие обозначения: КОС – канализационные очистные сооружения, ССА – Северная станция аэрации, ЦСА – Центральная станция аэрации, ЮЗОС – Юго-Западные очистные

сооружения; 1 – среднегодовое поступление общего азота ( $N_{общ.}$ ) и общего фосфора ( $P_{общ.}$ ) со стоком р. Невы и рукавов, 2 – среднегодовое поступление общего азота ( $N_{общ.}$ ) и общего фосфора ( $P_{общ.}$ ) в мелководную восточную часть Финского залива из Невской губы, 3А - среднегодовое поступление общего азота ( $N_{общ.}$ ) и общего фосфора ( $P_{общ.}$ ) с неучитываемых частных водосборов мелководной части Финского залива, 3Б - среднегодовое поступление общего азота ( $N_{общ.}$ ) и общего фосфора ( $P_{общ.}$ ) с неучитываемых частных водосборов Невской губы, включая примыкающие к Невской губе с востока территории Санкт-Петербурга и о. Котлин, 4А - среднегодовое поступление общего азота ( $N_{общ.}$ ) и общего фосфора ( $P_{общ.}$ ) с очищенными сбросами очистных сооружений в мелководную восточную часть Финского залива, 4Б - среднегодовое поступление общего азота ( $N_{общ.}$ ) и общего фосфора ( $P_{общ.}$ ) с очищенными сбросами очистных сооружений в Невскую губу; 5А - среднегодовое поступление общего азота ( $N_{общ.}$ ) и общего фосфора ( $P_{общ.}$ ) с атмосферными осадками в мелководную восточную часть Финского залива, 5Б - среднегодовое поступление общего азота ( $N_{общ.}$ ) и общего фосфора ( $P_{общ.}$ ) с атмосферными осадками в Невскую губу; \* - среднегодовая концентрация общего азота ( $N_{общ.}$ ) и общего фосфора ( $P_{общ.}$ ) в водах частей Финского залива.

#### 6.11. Практическое применения результатов исследования для имитационного компьютерного моделирования функционирования экосистемы Невской губы

Как уже указано, экосистема восточной части Финского залива и в особенности Невской губы находится под сильным антропогенным воздействием. 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). Модель разработана для

имитации антропогенного эвтрофирования и токсического загрязнения экосистем проточных водоёмов. Она была модернизирована В.Ю. Третьяковым для имитации функционирования экосистемы Невской губы. Форма водоёма изменена с шарового сегмента на параллелепипед. Объём водоёма принимается неизменным в течение всего года вне зависимости от суммарного объёма поступающих за сутки вод. Это допущение приемлемо для современных условий, когда поступление воды в Невскую губу равно объёму её поступления в восточную часть Финского залива через судопропускные ворота и водопропускные отверстия Комплекса защитных сооружений (КЗС). В случае прихода длинной волны затворы судопропускных и водопропускных сооружений КЗС СПб от наводнений закрываются. При этом подъём уровня воды в Невской губе незначителен и продолжается всего несколько часов, до времени прохождения длинной нагонной волны. Т.е. это время меньше, чем внешний шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений модели, равный суткам. При этом наводнения происходят поздней осенью и в начале зимы, когда первичная продукция экосистемы Невской губы крайне незначительна. Для выявления роли поступления соединений азота и фосфора с частных водосборных бассейнов Невской губы в эвтрофировании её экосистемы необходимо сравнение результатов численных экспериментов с компьютерной моделью этой экосистемы с имитацией и без имитации этого поступления.

Внешними экологическими факторами модели «EVTOX», с помощью которых имитируется поступление в неё субстанций с притоком воды, служат внутригодовые динамики субстанций в этом притоке, и внутригодовые динамики суточных объёмов притока воды. Результаты, указанные в разделах 6.8, 6.9 работы, являются внешними экологическим факторами модели. Всего этих факторов 5: сток Невы и её рукавов; суммарный сток 5 очистных сооружений, осуществляющие сброс в Невскую губу; атмосферные осадки; сток частных водосборов Невской губы, расположенных на её северном и

южном берегах; рассредоточенный сток с примыкающих к Невской губе территорий СПб и о. Котлин. Сравнение внутригодовых динамик компонентов модели и интенсивностей имитируемых процессов в численных экспериментах с моделью экосистемы Невской губы с имитацией и без имитации поступления соединений азота и фосфора с частных водосборов Невской губы позволяет оценить влияние этого неучитываемого дополнительного поступления на функционирование экосистемы. Сравнение результатов экспериментов было выполнено с помощью модифицированного критерия Нэша-Сатклиффа. Величина модифицированного критерия Нэша-Сатклиффа менее 10% указывает на практическое отсутствие различия динамик, 10-20 % – различие есть, но оно незначительно, более 20% – существенное различие, отражающее существенное изменение функционирования экосистемы.

На водосборных бассейнах Невской губы продолжается их антропогенное преобразование. Задание в модели значений модулей стока субстанций, характерных для территорий с разным уровнем антропогенного преобразования позволяет имитировать поступление в Невскую губу соединений азота и фосфора при различных уровнях антропогенного преобразования в будущем её водосборных бассейнов. Также на модифицированной модели «EVTOX» можно моделировать сценарии потепления воды и изменения ледового режима вследствие изменений климата.

Индикатором изменения трофического статуса экосистем является первичная продукция фитопланктона. Модифицированная модель «EVTOX» позволяет исследовать внутригодовую динамику первичной продукции фитопланктона при различных сценариях антропогенного воздействия на экосистему Невской губы.

По результатам численных экспериментов можно делать выводы о возможном изменении трофического статуса Невской губы при изменении существующих потоков соединений азота и фосфора. 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. Выполнено сопоставление внутригодовых динамик следующих компонентов и интенсивностей процессов модели экосистемы Невской губы: концентраций аммонийного, нитритного, нитратного и органического азота, фосфатов и органического фосфора; биомасс диатомей, сине-зеленых водорослей, остальных групп фитопланктона, общего фитопланктона, фитофагов и хищного зоопланктона; валовой и чистой продукции перечисленных групп фитопланктона; общей валовой и чистой первичной продукции. Трофическое состояние экосистемы оценивалось по следующим параметрам модели экосистемы: валовой первичной продукции за год, максимальной суточной первичной продукции, среднесуточной первичной продукции за период май-сентябрь.

В табл. 6.13 представлены результаты оценки степени различия внутригодовых динамик компонентов модели и первичной продукции в экспериментах с учетом и без учета влияния частных водосборов Невской губы на функционирование её экосистемы по модифицированному критерию Нэш-Сатклиффа.

Таблица 6.13 демонстрирует незначительные различия между внутригодовыми динамиками концентрации органического фосфора, валовой и чистой продукции диатомей и остального фитопланктона, за исключением сине-зеленых водорослей. Все остальные динамики в табл. 6.13 практически не имеют различий.

Таблица 6.13. Знач. модифицированного крит. Нэша – Сатклиффа по результатам сравнения внутригод. динамик в модельных экспериментах с влиянием частн. водосборов Нев. губы на её экосистему и без него.

Динамики	Значения критерия, %	Различия
Аммонийного азота	1,2	Нет
Нитритного азота	2,5	Нет
Нитратного азота	0,4	Нет
Органического азота	0,7	Нет
Фосфора фосфатов	1,8	Нет
Органического фосфора	18,5	Незначительное
Биомассы диатомовых водорослей	5,0	Нет
Биомассы сине-зеленых водорослей	0,7	Нет
Биомассы остального фитопланктона	1,7	Нет
Общей биомассы фитопланктона	2,2	Нет
Биомассы фитофагов	0,3	Нет
Биомассы хищного зоопланктона	0,0	Нет
Валовой продукции диатомовых	18,2	Незначительное
Валовой продукции сине-зеленых	2,6	Нет
Валовой продукции остального фитопланктона	10,3	Незначительное
Общей валовой первичной продукции	6,6	Нет
Чистой продукции диатомовых	18,2	Незначительное
Чистой продукции сине-зеленых	2,6	Нет
Чистой продукции остального фитопланктона	10,3	Незначительное
Общей чистой первичной продукции	6,6	Нет

Учет влияния частных водосборов Невской губы приводит к увеличению годовой валовой первичной продукции с 31,5 до 38,8 г углерода под м<sup>2</sup> поверхности. Но оно не приводит к изменению троф. состояния экосистемы. В обоих экспериментах оно является мезотроф. по шкале Г.Г. Винберга и олиготроф. по шкале В.И. Романенко (Дмитриев и Фрумин, 2004). Максимальная перв. продукция фитопланктона в сутки изменяется от 0,44 до 0,50 г углерода под м<sup>2</sup> поверхности. Оно не меняет мезотроф. состояние экосистемы (по шкале Г.Г. Винберга) (Дмитриев и Фрумин, 2004). Учет влияния частных водосборов приводит к незначительному изменению ср. валовой перв. продукции фитопланктона за вегет. период (май-сент.). Изменение составляет от 0,064 до 0,078 мгС/л в сутки. Оно не меняет мезотроф. состояние экосистемы в соответствии с классификацией Б.Л. Гутельмахера (Дмитриев и Фрумин, 2004).

## ВЫВОДЫ

- 1) По результатам анализа отечественных и зарубежных источников показана важность проблемы антропогенной эвтрофикации Мирового океана. Насчитывается более 400 прибрежных акваторий, подверженных антропогенной эвтрофикации. Балтийское море из-за замедленного водообмена и высокой доли урбанизации водосбора особенно страдает от антропогенной эвтрофикации. Нарушается равновесие экосистемы Балтийского моря из-за «цветения» воды, локального понижения концентрации кислорода, исчезновения гидробионтов.
- 2) Основными источниками поступления соединений азота и фосфора в водные экосистемы являются сточные воды, атмосферные осадки и рассеянный поверхностный сток. Поступление соединений азота и фосфора в водные экосистемы имеет региональную специфику. Отмечается проблема недоучёта поступления соединений азота и фосфора в водные экосистемы.
- 3) Анализ публикаций ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» показал, что работа этого предприятия в основном сосредоточена на сокращении поступления в водные объекты неочищенных хозяйствственно-бытовых и промышленных сточных вод. Пока недостаточно внимания уделяется сбору и очистке поступающего в водные объекты поверхностного стока. С 70 % территории Санкт-Петербурга поверхностный сток поступает в общесливную канализацию и почти на 100 % очищается на очистных сооружениях. А с 30 % территории города поверхностный сток поступает в дождевую систему водоотведения. К сожалению, из поступающих в эту систему вод очищается лишь около 4 %.
- 4) В результате сравнения модулей стока общего азота и фосфора с природных, сельскохозяйственных и урбанизированных территорий установлено, что сток общего азота и фосфора с урбанизированных и сельскохозяйственных территорий, как правило, превышает нормы

Helcom. И это происходит не только на водосборе Балтийского моря, но и в других регионах мира. Поэтому для сокращения азотной и фосфорной нагрузки на водные экосистемы объекты необходима разработка мер по снижению рассредоточенного стока соединений азота и фосфора с антропогенно-преобразованных территорий.

- 5) 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 азота и фосфора этих акваторий. Методика основана на применении цифровых моделей рельефа, ГИС-технологий, данных гидрохимического и гидрологического мониторинга водосборов-аналогов, кластерного анализа, применения модифицированного критерия Нэша-Сатклиффа.
- 6) Установлено, что с очистными сооружениями в среднем ежегодно в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах административной границы Санкт-Петербурга поступает около 6659 тонн общего азота и 525 тонн общего фосфора. Это составляет около 13 и 43 % от поступления со стоком реки Невы. Поступление субстанций со стоком очистных сооружений учитывается при планировании природоохранных мероприятий для защиты морской среды Балтийского моря.
- 7) Ориентированное 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 5,4 % от годового поступления общего азота со стоком реки Невы. Неучитываемое поступление общего фосфора больше: оно составляет около 13,8 % от его поступления со стоком Невы. С атмосферными выпадениями на ту же акваторию поступает ещё около 1,6 и 6,7 % общего азота и фосфора от стока р. Невы и её рукавов.

- 8) Существующая оценка СЗУГМС поступления азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах СПб учитывает большую часть этого поступления. Однако эта оценка может быть дополнена и уточнена результатами нашего исследования. Существует недоучёт поступления в Невскую губу в размере около 7 % по общему азоту и 20,5 % по общему фосфору. Это доп. поступление с неучитываемых при мониторинге водосборов и с атм. осадками.
- 9) Показано, что 97 % общего азота и фосфора поступает в восточную часть Финского залива из Невской губы. В обратном направлении поступление практически отсутствует, т.к. среднегодовые концентрации этих субстанций в Невской губе существенно выше концентраций в восточной части Финского залива.
- 10) По результатам исследования установлено, что модули стока с неучитываемых при мониторинге водосборов водотоков, впадающих в Невскую губу и восточную часть Финского залива с территории СПб, значительно превышают максимально допустимые нормы Helcom. Согласно нашим расчётам модули стока составляют 1,113 и 0,066 тонн/км<sup>2</sup> в год общего азота и фосфора соответственно при максимально допустимых Helcom 0,236 и 0,011 тонн/км<sup>2</sup> в год.
- 11) На основании результатов исследования были подготовлены данные для компьютерного имитационного моделирования экосистемы Невской губы с учетом и без учета доп. поступления соединений азота и фосфора с неучитываемых при мониторинге водосборов. Моделирование экосистемы Невской губы было произведено на модификации компьютерной программы «EVTOX» (автор - В.Ю. Третьяков, правообладатель - СПбГУ). Показано, что дополнительное поступление соединений азота и фосфора с неучитываемых при мониторинге водосборов не оказывает значительного влияния на функционирование экосистемы Невской губы и не меняет её трофический статус.

## Список использованных источников

- 1) Алябина Г.А., Сорокин И.Н. Особенности формирования внешней нагрузки на водные объекты в урбанизированных ландшафтах // Изв. РГО. 2001. Т. 133. № 1. С. 81-87.
- 2) Боков В. А., Буряк В. В. Ноосферные реалии и утопии // Геополитика и экогеодинамика. 2013. №2. С. 18-29
- 3) Владимира О.М., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Рябченко В.А., Савчук О.П. Модельные оценки составляющих баланса азота и фосфора в экосистеме Финского залива // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2018. № 53. С. 72-82.
- 4) Гашкина, Н. А. Биогеохимическая миграция элементов на водосборе озера в фоновом регионе (Валдайская возвышенность) / Н. А. Гашкина, Т. И. Моисеенко // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2020. – Т. 491, № 2. – С. 89-95.
- 5) Герман А.В., Серебрицкий И.А. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге. СПб: Изд-во Сезам-принт, 2023, 226 с.
- 6) Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем – СПб., 2004. – 294 с
- 7) Еремина И.Д. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2019. №3. С. 3-10.
- 8) Ершова А.А. Комплексная оценка поступления биогенных веществ с водосбора реки Невы в восточную часть Финского залива. Автореф. дис. ... канд. геогр. н. СПб, РГГМУ, 2013. 28 с.
- 9) Клубов С.М., Третьяков В.Ю., Дмитриев В.В., Рожкова Ю.О.. Оценка вклада санитарно-технических мероприятий в снижение поступления общего фосфора и азота в Балтийское море с водосборов рек Волковки и Охты Санкт-Петербурга // Известия РГО. 2022. Т. 154. №4, С. 54-68

- 10) Кондратьев С.А. Оценка биогенной нагрузки на Финский залив Балтийского моря с российской части водосбора // Водные ресурсы, 2011, т. 38 №1. С. 56-64
- 11) Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Викторова Н.В., Ершова А.А., Обломкова Н.С. К оценке биогенного стока в Финский залив Балтийского моря // Ученые записки Российской государственного гидрометеорологического университета. 2018. № 51. С. 109–120
- 12) Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Викторова Н.В., Уличев В.И. Фосфорная нагрузка на Финский залив с прибрежной территории России // Вестник РАН, 2014 т. 84, № 10, с. 913-919
- 13) Косов Ю.В., Грибанова Г.И. Стратегия ЕС для региона Балтийского моря: проблемы и перспективы международного сотрудничества. Балтийский регион, 2016. Т.8. №2. С. 48–66.
- 14) Кубарев М. С. Эволюционные изменения в направлениях // Известия УГГУ. 2017. Вып. 3(47). С. 85–92. DOI 10.21440/2307-2091-2017-3-85-92
- 15) Лачининский С.С., Семенова И.В. Позиционирование мирового приморского города Санкт-Петербурга в Балтийском регионе. Балтийский регион, 2015. № 3(25). С. 62–75.
- 16) Лозовик П.А., Бородулина Г.С., Карпенко Ю.В., Кондратьев С.А., Литвиненко А.В., Литвинова И.А., Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. №5. С. 35-52
- 17) Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчетах темпов смыва почв на пахотных землях. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки, 2018. Т. 160. Кн. 3. С. 514–530.
- 18) Минакова Е. А., Шлычков А. П. Выпадения биогенных веществ с атмосферными осадками в бассейне Средней и Нижней Волги // Проблемы региональной экологии. 2018. №6. С. 92-97.

- 19) Мосин О.В. Основные экологические проблемы Балтийского моря и пути их решения. Балтийский регион, 2011. №1(7). С. 41–53.
- 20) Нежиховский Р.А. Река Нева и Невская губа. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1981. 84 с.
- 21) Осипов А.Г., Осипов Г.К., Ковязин В.Ф. Методика геоинформационного моделирования выноса биогенных веществ в Финский залив из лесного растительного покрова. Интеркарто. Интергис-26, 2020. Т. 26. Ч. 2. С. 137–150. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-137-150.
- 22) Патин С.А. Антропогенное воздействие на морские экосистемы и биоресурсы: источники, последствия, проблемы. Антропогенное воздействие на морские экосистемы и биоресурсы: источники, последствия, проблемы. Труды ВНИРО, 2015. Том 154. С. 85-104
- 23) Потапова Т.М., Джиноридзе Е.Н., Королева В.П., Богданов В.Л., Шмелева И.В. Новые сведения о развитии процессов эвтрофикации литоральной зоны восточной части Финского залива. Вестник СПбГУ, 2005. Сер. 7. Вып. 4. С. 76–86.
- 24) Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП). ГЭП-6. Доклад об оценке по панъевропейскому региону. Найроби: Издательство Организации Объединенных Наций в Найроби, 2016, 464 с.
- 25) Свистов П.Ф., Першина Н.А., Павлова М.Т. Атлас диаграмм химического состава атмосферных осадков (применение). Москва: Издательство «Перо», 2023. – 140 с.: ил. 145, табл. 26.
- 26) Семенец Е.С., Свистов П.Ф., Талаш А.С. Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья // Известия ТПУ. 2017. №3. С. 27-36.
- 27) Степanova Е.В. Оценка фоновой составляющей стока валового фосфора с водами контролируемых и неконтролируемых рек бассейна Балтийского моря. Молодой ученый, 2009. № 11. С. 352–355.

- 28) Третьяков В.Ю., Селезнёв Д.Е. Особенности естественного внутригодового стока биогенных элементов в реках бассейна Финского залива // Метеорологический вестник. 2012. № 1(4). С. 155-270
- 29) Фёдоров Г.М., Михайлов А.С., Кузнецова Т.Ю. Влияние моря на развитие экономики и расселения стран Балтийского региона // Балтийский регион. 2017. Т. 9, № 2. С. 7—27.
- 30) Фрумин Г.Т. Геоэкология: Реальность, научообразные мифы, ошибки, заблуждения. Учебное пособие. СПб: Изд-во РГГМУ, 2006, 122 с.
- 31) Фрумин Г.Т., Каретникова Т.И. Динамика поступления биогенных элементов в Финский залив со стоком российских и трансграничных рек // Региональная экология 2017. №1(47). С. 85 – 92
- 32) Чубаренко Б.В., Кондратьев С.А., Брюханов А.Ю. Биогенная нагрузка на Балтийское море с Российской территории водосборов Калининградского/Вислинского и Куршского заливов. Известия Русского географического общества. 2017. № 149(4). С. 69–84.
- 33) Ясинский С.В., Веницианов Е.В., Вишневская И.А. Диффузное загрязнение водных объектов и оценка выноса биогенных элементов при различных сценариях землепользования на водосборе. Водные ресурсы. 2019, т. 46, №2, с. 232-244
- 34) Andersen, J .H ., Halpern, B .S ., Korpinen, S ., Murray, C . and Reker, J. Baltic Sea biodiversity status vs cumulative human pressures. // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2015. 161, 88e-92 . doi: 10 .1016/j .ecss .2015 .05 .002
- 35) Anderson K.A., Downing J.A. Dry and wet atmospheric deposition of nitrogen, phosphorus and silicon in an agricultural region // Water Air Soil Pollut. – 2006. – Vol. 176. – P. 351–374.
- 36) Barrus S.M., Williams G.P., Miller A.W., Borup M.B., Merritt L.B., Richards D.C., Miller T.G.. Nutrient Atmospheric Deposition on Utah Lake: A Comparison of Sampling and Analytical Methods. Hydrology. 2021; 8(3):123.

- 37) Brylinsky M. Users Manual for Prediction of Phosphorus Concentration In Nova Scotia Lakes: A Tool for Decision Making. Version 1.0, Acadia Centre for Estuarine Research, Acadia University, Wolfville, Nova Scotia, B4P 2R6, Canada, 2004. 88 pp.
- 38) Butler D., Davies J.W. Urban Drainage. Taylor & Francis e-Library, 2011, 652 p. DOI: 10.1201/9781315272535.
- 39) Feely, R.A., Doney, S.C. и Sarah, R. Ocean acidification: present conditions and future changes in a high-CO<sub>2</sub> world. // Oceanography. 2009. 22(4), pp. 36–47
- 40) Feng Y.W., Yoshinaga I., Shiratani E., Hitomi T., Hasebe H. Nutrient balance in a paddy field with a recycling irrigation system. Water Sci Technol, 2005. V. 51. No. 3–4. P. 14-35–14-39. DOI: 10.2166/wst.2005.0586.
- 41) Frumin G.T., Gildeeva I.M. Eutrophication of water bodies – a global environmental problem, Russian Journal of General Chemistry, 2014. V. 84. No. 13. P. 2483–2488. DOI: 10.1134/S107036321413001.
- 42) Huang, Y., Lu, X. & Chen, K. Wet atmospheric deposition of nitrogen: 20 years measurement in Shenzhen City, China. Environ Monit Assess. 2013. 185, 113–122
- 43) Jolankai G. Modelling of non-point source pollution. In: Application of Ecological Modelling in Environmental Management, Part A. (ed. S. E. Jorgensen). 1983, pp. 283–285. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam
- 44) Klubov S.M., Tretyakov V.Yu., Influence of St. Petersburg urban rivers on the inflow of pollutants into the Baltic Sea // E3S Web of Conferences Volume 163 (2020) "IV Vinogradov Conference “Hydrology: from Learning to Worldview” in Memory of Outstanding Russian Hydrologist Yury Vinogradov" p. 1-5

- 45) Koszelnik P. Atmospheric deposition as a source of nitrogen and phosphorus loads into the Rzeszów reservoir, SE Poland // Environment Protection Engineering. – 2007. – Vol. 33, No 2. – P. 157-164.
- 46) Li K., Liu X., Song W., Chang Y., Hu Y., Tian C., Coles J.A. Atmospheric Nitrogen Deposition at Two Sites in an Arid Environment of Central Asia // PLoS ONE. – 2013. – Vol. 8, № 6.
- 47) Marsalek J., 2015. Evolution of urban drainage from cloaca maxima to environmental sustainability, in: proceedings I Nat. conf. of urban sanitary engineering. p. 1-22
- 48) Novotny, V., Wang, X., Englande, A.J.J., Bedoya, D., Promakasikorn, L. и Tirado, R. Comparative assessment of pollution by the use of industrial agricultural fertilizers in four rapidly developing Asian countries.  
(«Сравнительная оценка загрязнения при использовании промышленных сельскохозяйственных удобрений в четырёх быстро развивающихся странах Азии») // Environment Development and Sustainability. 2010. 12(4). C. 491–509. <https://doi.org/10.1007/s10668-009-9207-2>.
- 49) Radulescu D., Racoviteanu G. and Swamikannu X., 2018 Comparison of urban residential storm water runoff quality in Bucharest with int. data. E3S Web of Conferences, vol. 85, pp. 1-9
- 50) Rekolainen S., 1989, Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland // Aqua Fennica, vol. 19. № 2. pp. 95–107.
- 51) Riegler G., Hennig S.D., Weber M. WORLDDEM – a novel global foundation layer. Proceedings of Joint ISPRS conference, 2015. V. XL-3/W2. P. 183–187. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-3-W2-183-2015.
- 52) Savchuk O. P. and Wulff F. Modeling the Baltic Sea Eutrophication in a Decision Support System // Royal Swedish Academy of Sciences. Ambio, 2007 Vol. 36, No. 2–3, p.141-148
- 53) Sohoulande C., Szogi A.A., Novak J., Stone K., Martin J., Watt, D. Long-Term Nitrogen and Phosphorus Outflow from an Instream Constructed Wetland

- under Precipitation Variability. Sustainability, 2022. V. 14. DOI: 10.3390/su142416500.
- 54) Stepanova E.V., Frumin G.T. Background nitrogen concentrations in the unmonitored and partially monitored rivers of the Gulf of Finland basin, Russian journal of general chemistry, 2014. V. 84. No. 13. P. 2592–2595. DOI: 10.1134/S1070363214130167.
- 55) Sun L., Li B., Ma Y., Wang J., Xiong Z. Year-Round Atmospheric Wet and Dry Deposition of Nitrogen and Phosphorus on Water and Land Surfaces in Nanjing, China // Water environment research : a research publication of the Water Environment Federation. – 2013. – Vol. 85.
- 56) Tretyakov V., Dmitriev V., Sergeev Y., Kulesh V., Monitoring of an aquatic ecosystem ecological status and assessment of its resistance to anthropogenic impacts by results of simulation, 19th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM2019/Conference Proceedings. Volume 19. Ecology, economics, education and legislation. Issue 5.1. Ecology and environmental protection, Albena, Bulgaria, pp 485-492, 2019. DOI: 10.5593/sgem2019/5.1
- 57) Umezawa, Y., Hosono, T., Onodera, S., Siringan, F., Buapeng, S., Delinom, R. и др. Erratum to “Sources of nitrate and ammonium contamination in groundwater under developing Asian megacities”. («Исправление «Источники загрязнения грунтовых вод нитратами и аммонием в развивающихся азиатских мегаполисах») // Science of the Total Environment. 2009. 407(9). C. 3219–3231
- 58) UNEP. Global environmental outlook. GEO5. MALTA: PROGRESS PRESS LTD, 2012, 616 p.
- 59) United States Environm. Protection Agency. Source Water Protection Practices Bull. 2001. pp. 1-7
- 60) United States Fed. Water Pollution Control Act. 1972

- 61) Wulff F., Sokolov A., Savchuk O. Nest – a decision support system for management of the Baltic Sea. A user manual. Stockholm: Baltic Nest Institute. 2013, 70 p. ISBN: 978-91-86655-09-9
- 62) Zhai, S., Yang, L. & Hu, W. Observations of Atmospheric Nitrogen and Phosphorus Deposition During the Period of Algal Bloom Formation in Northern Lake Taihu, China. Environmental Management – 2009. – Vol. 44, 542–551
- 63) Zhang X., Lin C., Zhou X., Lei K., Guo B., Cao Yu., Lu S., Liu X., He M. Concentrations, fluxes, and potential sources of nitrogen and phosphorus species in atmospheric wet deposition of the Lake Qinghai Watershed, China // Science of The Total Environment. – 2019. – Vol. 682.

#### Интернет-источники

- 64) HELCOM Baltic Sea Action Plan // HELCOM Ministerial Meeting. Krakow, Poland, 15 November 2007. 101 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://helcom.fi/baltic-sea-action-plan/> – 05.01.24.
- 65) Open street map [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.openstreetmap.org/> – 28.04.2024
- 66) Pearce, F. Can the world find solutions to the nitrogen pollution crisis? («Сможет ли мир найти решения кризиса загрязнения азотом?»). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e360.yale.edu/features/can-the-world-find-solutions-to-the-nitrogen-pollution-crisis> – 25.06.2025
- 67) SRTM. Глобальная база данных высот. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://srtm.csi.cgiar.org/> – 17.01.23
- 68) Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 08.08.2024) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_60683/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/) – 19.07.2025

- 69) Водоканал Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
<https://www.vodokanal.spb.ru/> – 25.02.2024
- 70) Всемирная организация здравоохранения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.who.int/> – 25.06.2025
- 71) Всемирная организация здравоохранения. Европейский портал информации здравоохранения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://gateway.euro.who.int/ru/indicators/enhis\\_4-population-connected-to-wastewater-treatment-facilities/#id=20723&fullGraph=true](https://gateway.euro.who.int/ru/indicators/enhis_4-population-connected-to-wastewater-treatment-facilities/#id=20723&fullGraph=true) – 07.02.25
- 72) Геоматика. Цифровые модели рельефа. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sovzond.ru/upload/iblock/090/78-82.pdf?ysclid=lftrynmfv1639099589> – 17.01.23
- 73) Государственная статистика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fedstat.ru/indicator/58360> – 25.06.2025
- 74) Детский фонд ООН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.unicef.org/> – 25.06.2025
- 75) Европейская рамочная директива [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wareg.org/articles/the-essence-of-the-water-framework-directive/> – 25.06.2025
- 76) Европейская экономическая комиссия ООН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://w3.unece.org/SDG/ru/Indicator?id=116> – 25.06.2025
- 77) Европейское агентство по охране окружающей среды. From source to sea — The untold story of marine litter, 2024 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eea.europa.eu/publications/european-marine-litter-assessment> – 07.02.25
- 78) Европейское агентство по охране окружающей среды. From source to sea — Climate change as a threat to health and well-being in Europe: focus on heat and infectious diseases, 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/climate-change-impacts-on-health> – 07.02.25

- 79) Европейское агентство по охране окружающей среды. Доклад на основе показателей «Водные ресурсы, качество поверхностных вод и водопотребление», 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://gateway.euro.who.int/ru/indicators/enhis\\_4-population-connected-to-wastewater-treatment-facilities/#id=20723&fullGraph=true](https://gateway.euro.who.int/ru/indicators/enhis_4-population-connected-to-wastewater-treatment-facilities/#id=20723&fullGraph=true) – 07.02.25
- 80) Институт озероведения РАН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://limno.ru/developments/math\\_models/](https://limno.ru/developments/math_models/) – 18.04.2024
- 81) Карта-схема высот Санкт-Петербурга. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://not.textual.ru/zverik/2/3/spb\\_heights.gif](http://not.textual.ru/zverik/2/3/spb_heights.gif) – 22.03.2024
- 82) Комиссия по сохранению морских живых ресурсов Антарктики (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ccamlr.org/ru> – 28.04.2024
- 83) Международная общественная природоохранная организация Гринпис (Greenpeace) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.greenpeace.org.uk/> – 28.04.2024
- 84) Межправительственная группа экспертов по изменению климата. Отчёт, 2023 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> – 07.02.25
- 85) Межправительственная организация Международная морская организация (IMO – International Maritime Organization) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.imo.org/en> – 28.04.2024
- 86) Некоммерческое общество охраны морской фауны Sea Shepherd Conservation Society («Морской пастух») [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://seashepherd.org/> – 28.04.2024
- 87) Обновленный План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю до 2030 года — Окружающая среда Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ecopeterburg.ru/2021/12/13/%D0%BE%D0%B1%D0%BD%D0%BE%>

- D0% B2% D0% BB% D0% B5% D0% BD% D0% BD% D1% 8B% D0% B9-  
% D0% BF% D0% BB% D0% B0% D0% BD-  
% D0% B4% D0% B5% D0% B9% D1% 81% D1% 82% D0% B2% D0% B8% D0% B  
9-% D1% 85% D0% B5% D0% BB% D0% BA% D0% BE% D0% BC-  
% D0% BF% D0% BE-% D0% B1/?ysclid=mcx5uvgfm2310962726 – 13.07.2025
- 88) Общественные наблюдения природных вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://riverwatch.ecocentrum.ru/> – 05.01.24.
- 89) Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО - UNESCO) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.unesco.org/ru> – 28.04.2024
- 90) Организация Объединенных Наций. Народонаселение. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.un.org/development/desa/pd/> – 15.08.2025
- 91) Поступление биогенных элементов с суббассейнов Балтийского моря 1995-2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
[https://indicators.helcom.fi/wp-content/uploads/2023/04/HELCOM-Core-indicator-on-nutrients-1995-2021\\_PDF\\_October2024.pdf](https://indicators.helcom.fi/wp-content/uploads/2023/04/HELCOM-Core-indicator-on-nutrients-1995-2021_PDF_October2024.pdf) – 13.07.2025
- 92) Росприроднадзор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rpn.gov.ru/> – 05.01.24
- 93) Росстат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/> – 25.06.2025
- 94) Сайт Правительства Германии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bundestag.de/ru> – 27.02.2024
- 95) Сайт правительства Латвии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mk.gov.lv/> – 27.02.2024
- 96) Сайт Правительства Польши [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gov.pl/> – 27.02.2024
- 97) Сайт Правительства Финляндии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://valtioneuvosto.fi/en/frontpage> – 27.02.2024

- 98) Сайт Правительства Швеции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.government.se/> – 27.02.2024
- 99) Сайт федеральной службы государственной статистики РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gks.ru> – 27.03.2024
- 100) Северо-западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.meteo.nw.ru/> – 06.01.24
- 101) Список стран по урбанизации ООН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2014-Report.pdf> – 27.02.2024
- 102) Статистическая служба Литвы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://osp.stat.gov.lt/informaciniai-pranesimai?eventId=288049> – 27.02.2024
- 103) Статистическая служба Эстонии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://andmed.stat.ee/en/stat/> – 27.02.2024
- 104) Топографическая карта СПб и ЛО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.etomesto.ru/> – 28.03.2024
- 105) Федеральный проект «Вода России» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/new-projects/ekologicheskoe-blagopoluchie/voda-rossii/> – 19.07.2025
- 106) Цели в области устойчивого развития [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/?ysclid=mdal5myvp2771678163> – 19.07.2025
- 107) Цели в области устойчивого развития ООН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> – 28.04.2024
- 108) ЮНЕП. Глобальное партнерство по управлению питательными веществами. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.unep.org/ru/issleduyte-temy/okeany-i-morya/nasha-deyatelnost/reshenie-problemy-zagryazneniya-s-sushi/globalnoe> – 28.04.2024

- 109) ЮНЕП. Почему важно бороться с загрязнением из наземных источников. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.unep.org/explore-topics/oceans-seas/why-does-addressing-land-based-pollution-matter> – 28.04.2024
- 110) ЮНЕП. Почему миру необходимо ограничить загрязнение азотом. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.unep.org/ru/novosti-istorii/istoriya/pochemu-miru-neobkhodimo-ogranichit-zagryaznenie-azotom-chetyre-prichiny> – 28.04.2024
- 111) ЮНЕП. Проблема управления питательными веществами. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.unep.org/ru/issleduyte-temy/okeany-i-morya/nasha-deyatelnost/reshenie-problemy-zagryazneniya-s-sushi-1> – 28.04.2024

*Благодарности:* исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-27-10011, и при финансовой поддержке Санкт-Петербургского научного фонда (СПбНФ).