



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

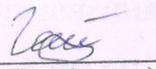
На тему **Оценка изменчивости**  
**биогенной нагрузки с речных водосборов**

Исполнитель Воробьева Анастасия Павловна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Т.Н., доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Викторова Наталья Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

  
(подпись)

К.Т.Н., доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«02» июня 2025г.

Санкт-Петербург  
2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Физико-географическое описание рек, впадающих в Балтийское море .....	6
1.1 Географическое описание района .....	6
1.2 Рельеф .....	6
1.3 Геология .....	8
1.4 Гидрография .....	10
1.4.1 Река Нева .....	11
1.4.2 Река Луга .....	13
1.4.3 Река Нарва .....	14
1.4.4 Река Селезневка .....	15
1.5 Климат.....	16
1.6 Гидрометеорологическая изученность .....	18
2 Обзор литературы в области оценки изменения биогенной нагрузки на бассейн.....	21
2.1 Организация HELCOM .....	21
2.2 Сценарии SSP и RCP .....	22
2.3 Статистические аспекты обработки данных в рамках проекта HELCOM PLC-8 .....	26
2.3.1 Обработка пропущенных данных и выбросов .....	26
2.3.2 Неопределенность исходных данных (ежегодные поступления от конкретной страны или района) .....	28
2.3.3 Анализ тенденций, точек изменения и их оценка.....	30
2.3.4 Проверка выполнения целей BSAP .....	31
2.4 Анализ динамики биогенных элементов в переходных зонах .....	32
2.5 ERGOM. 3D-экосистемная модель Балтийского моря.....	34
3 Расчет изменчивости биогенной нагрузки .....	35
3.1 Исходные данные.....	35
3.2 Оценка значимости трендов .....	36
3.3 Оценка однородности рядов .....	43

3.4	Нормализация.....	46
3.5	Метод Манна-Кендалла .....	51
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>56</b>
	<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	<b>58</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ</b> .....	<b>61</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ</b> .....	<b>63</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ</b> .....	<b>65</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ</b> .....	<b>67</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Графики логарифмических зависимостей, хронологического хода концентраций и расхода воды</b> .....	<b>69</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ по методу Манна-Кендалла</b> .....	<b>75</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ по методу Манна-Кендалла</b> .....	<b>77</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ И – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ по методу Манна-Кендалла</b> .....	<b>79</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ К – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ по методу Манна-Кендалла</b> .....	<b>81</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Водные ресурсы являются одними из самых важных на нашей планете, в особенности пресная вода. На долю пресной воды приходится всего лишь 2.5-3% от общего количества. Однако их сохранность находится под угрозой в связи с развитием промышленности, что влечет за собой огромный ущерб не только для водных ресурсов, но также и для биологических видов, проживающих в этой среде.

За последние 100 лет уровень загрязнения рек в среднем вырос не менее чем в 2 – 5 раза, что указывает на важность и актуальность данной темы. В современном мире существует множество технологий, которые можно применить в области уменьшения загрязнения водных объектов и их мониторинга.

Северо-Западный регион России имеет выход к Балтийскому морю через Финский залив в районе города Санкт-Петербург и Ленинградской области, которые являются одними из крупнейших промышленных регионов нашей страны. Также этот район имеет развитую гидрологическую сеть, которая подвергается активным загрязнениям. Тонны этих веществ ежегодно попадают в реки и далее море.

Чтобы следить и предотвращать чрезмерное поступление биогенных веществ дальше в Балтийское море и их дальнейшее поступление в океан, была создана организация HELCOM, которая заключила соглашение со странами, имеющими непосредственный выход к морю. В рамках этого, страны должны предоставлять данные о стоке этих веществ на их территории и принятии соответствующих мер по их снижению. В районе Финского залива с российской стороны эти данные фиксируются на четырех реках: Селезневка (Выборгский район Ленинградской области), Нева (г. Санкт-Петербург), Луга (Лужский район Ленинградской области) и Нарва (Кингисеппский район Ленинградской области).

Целью работы является:

- сбор данных по биогенным показателям за период наблюдений;

- ознакомление с методами, с помощью которых можно оценить биогенную нагрузку;
- сформулировать выводы и оценить степень подверженности биогенной нагрузке района исследований.

Задачи работы:

- обработать данные наблюдений по всем постам;
- построить графики хода концентраций веществ в течении периода наблюдений;
- определить значимости трендов биогенных показателей;
- выполнить оценку однородности рядов по критериям Стьюдента и Фишера;
- провести нормализации рядов и выполнить оценку по тесту Манна-Кендалла;
- провести анализ полученных результатов и их сравнение.

# 1 Физико-географическое описание рек, впадающих в Балтийское море

## 1.1 Географическое описание района

Территория Северо-Запада делится на два географических региона:

- 1) низменности на северо-западе;
- 2) возвышенности на востоке, юго-востоке и юге.

Северо-Запад расположен в основном на низменности вдоль побережья Балтийского моря (Прибалтийская низменность), простирающейся на запад до Эстонии и Латвии, а также на север и северо-восток до Карелии.

## 1.2 Рельеф

Прибалтийская низменность представляет собой довольно волнистую однообразную равнину с выраженными перепадами высот и несколькими холмами. Абсолютны отметки поверхности составляют в среднем от 50 до 100 метров, но наиболее значительные возвышенности достигают 200 – 300 метров. Выделяют четыре основных плато: плато в центре Карельского перешейка, Силурийское плато в центре Ленинградской области, Лужскую возвышенность на северо-востоке от Пскова, Судомская возвышенность к югу от Порхова и Бежаницкая возвышенность к югу от Новоржева.

В центре Карельской возвышенности состоит из моренной равнины – высокое плато, сильно расчлененное сетью рек. Вдоль ее южного края расположены камовые холмы (например, Лемболовские и Токсовские высоты).

Силурийское (Ордовикское) плато, протянувшееся почти в широтном направлении от реки Нарвы на западе до реки Сяси на востоке, представляет собой плоскую возвышенную равнину. Его западная сторона – самая широкая и высокая, называется Ижорское плато. Здесь развит карст в ордовикских известняках и доломитах. Вдоль северной оконечности Силурийского плато тянутся

крутые обрывы (глинты), отделяющие его от Предглинтовой низменности. На западе обрывы изрезанные, высотой 30 – 50 и более метров, а на востоке они выравняются и не превышают 15 метров.

Лужская, Судомская и Бежаницкая возвышенности – меридиональные зоны окраинно-ледникового рельефа, соответствующие разным стадиям Валдайского оледенения, со сложным чередованием конечноморенных холмов, гряд и камовых холмов высотой 100 – 125 метров.

Низменности с абсолютными отметками 0 – 50 м, редко более, расположены в северной, центральной и западной частях территории. К ним относятся (с севера на юг) Вуоксинская низменность к северу от Карельского перешейка, Предглинтовая низменность, включающая котловины Финского залива, Ладожского и Онежского озер, Приильменская (Волхово-Ловатская) низменность, которая располагает в себе озеро Ильмень, а также котловины Чудского и Псковского озер (Чудско-Псковская низменность).

Восточная, юго-восточная и южная возвышенные части Северо-Западного региона расположены в пределах Валдайской возвышенности, которая дугой огибает Прибалтийскую низменность от восточного берега Онежского озера до города Великие Луки и заходит на территорию Белоруссии и Литвы. Валдайская возвышенность является краевой зоной Валдайского ледника. Южная часть Валдая сложена девонскими отложениями и представляет собой округлые холмы и гряды, разделенные долинами и оврагами с множеством озер. Высота холмов и гряд колеблется от 20 до 50 метров. Абсолютная отметка поверхности достигает 320 метров (в районе города Валдай), в среднем отметки составляют 150 – 200 метров. Валдайская возвышенность отделена от Прибалтийской низменности Карбоновым уступом шириной от 5 до 30 километров и высотой от 70 до 100 метров. Уступ представляет собой склон, изрезанный многочисленными глубокими современными речными долинами, которые интенсивно дренируют водоносные горизонты каменноугольных пластов. В некоторых местах уступ маскируется конечноморенными образованиями.

Карбоновое плато характеризуется развитием карстовых форм рельефа, проявляющихся в виде многочисленных карстовых воронок, долин, оврагов, озер и источников, которые в некоторых местах образуют характерные карстовые формы рельефа.

### 1.3 Геология

В геологическом отношении Балтийский щит представляет собой регион, сложенный преимущественно древними кристаллическими породами архейско-протерозойского комплекса.

Северо-западные территории, в отличие от Карелии, состоят в основном из осадочных пород палеозойского комплекса.

Самые древние палеозойские и протерозойские образования представлены эруптивными и обломочно-осадочными породами, метаморфизованными в кристаллические сланцы. Они в основном смещены к северо-западу.

Протерозойские породы встречаются в северо-западной части Ладожского озера. Протерозой подразделяется на нижнюю и верхнюю подгруппы.

Северо-Западная территория почти полностью лежит в пределах Русской платформы и состоит из осадочных дочетвертичных отложений, подстилающих четвертичные отложения архейского или протерозойского кристаллического основания. Северная оконечность территории, часть Карельского перешейка, относится к южной части Балтийского щита и состоит из древнейших кристаллических пород архейско-протерозойского комплекса, представленных различными типами гнейсов и сланцев.

Осадочные породы на территории района представлены палеозойскими отложениями, в основном: нижнекембрийскими, нижнедевонскими, средне- и верхнедевонскими, ниже- и среднекаменноугольными толщами.

Древний стратиграфический горизонт палеозойской осадочной толщи плавно опускается под углом 10 – 15° под более молодые толщи в направлении

с северо-запада на юго-восток. На крайнем северо-западном склоне района залегают песчаные глинистые породы нижнекембрийского возраста общей толщиной 200 – 500 метров, подстилаемая четвертичные отложения.

На юге ордовикские отложения развиваются почти в широтном направлении, образуя Ордовикское (Силурийское) плато, с крупными обрывами (Балтийско-Ладожский глинт), образующими скалы в направлении Предглинтовой низменности. Ордовикские отложения представлены песчаниками, известняками и доломитами общей мощностью 100 – 150 метров. В основании Силурийского плато и прорезающих его речных долин прослеживаются выходы синих кембрийских глин и песчаников.

К югу и востоку от Ордовикского плато развиты обширные области преимущественно девонских отложений, занимающие около 60% всей площади Северо-Запада. Они представлены двумя отделами – средним (песчаники, доломиты) и верхним. Мощность среднедевонских отложений составляет 50 – 100 метров, а верхнедевонских – до 300 метров.

На востоке и юго-востоке области развития девонских отложений сменяются полосами вытянутых карбоновых пород, составляющих так называемое Карбоновое плато. Карбоновые отложения представлены ниже- и среднекаменноугольным отделами. Нижний карбон состоит из известняково-доломитовых слоев мощностью 60–95 метров. Средний же слогаается из известняков и доломитов. Мощность неравномерна и колеблется от 12 до 80 метров. Карбоновые известняки трещиноватые и закарстованы.

Палеозойские осадочные породы повсеместно перекрыты четвертичными отложениями, мощность которых варьируется от 0.5 до 200 метров. Они представлены комплексом ледниковых и послеледниковых толщ. Наиболее древними являются московская морена и водноледниковые отложения, которые перекрываются комплексом позднеледниковых песчаных флювиогляциальных и озероледниковых песчано-глинистых отложений. Четвертичный разрез заканчивается послеледниковыми и современными отложениями. Они обычно перекрываются

озерными и морскими песчано-глинистыми отложениями, аллювиальными отложениями, торфяниками и эоловыми (дюнными) песками.

Минимальная мощность четвертичных отложений составляет 0.5 – 5 метров на Силурийском плато и 10 – 20 метров на Приильменской и Предглинтовой низменностях.

Наибольшая мощность достигает 160 – 200 метров на Судомской возвышенности и 100 – 180 метров на возвышенности Центральной Карелии. Четвертичные отложения значительной мощности от 60 до 120 метров наблюдаются также в краевой зоне формирования последнего отделения. Эта зона приурочена в основном к Карбоновому плато и его склонам, которые представляют собой поверхностные интрузии дочетвертичных пород, блокировавших ледниковое продвижение и способствовавших накоплению ледниковых отложений.

#### 1.4 Гидрография

Реки региона имеют преимущественно смешанное питание с преобладающим снеговым. Помимо таяния снега, в питании рек участвуют дождевые и грунтовые воды. Ежегодный ход уровня воды включает в себя весеннее половодье, летне-осеннюю и зимнюю межени, осенние паводки. В зависимости от того, насколько река зарегулирована озерами, колебания уровня воды могут быть резкими или сглаженными. На незарегулируемых или слабозарегулируемых реках высота весеннего половодья может достигать от 2.5 до 4.5 метров. Подъем весеннего половодья обычно начинается во 2 декаде апреля. Самое раннее: во второй половине марта – начале апреля. Самое позднее: в конце апреля – начале мая. Период половодья длится от 1 до 1.5 месяцев, а на реках, зарегулированных озерами, до 1.5 – 2 месяцев.

Летне-осенняя межень обычно начинается в конце мая – первой половине июня. Продолжительность составляет 60 – 120 дней. Период летней межени прерывается одним-тремя паводками высотой не более 0.5 – 1 метра. В отдельные годы паводки, вызванные дождями, бывают более сильными. Летний минимум

обычно наблюдается в июле, реже – в августе-сентябре. На реках Карельского перешейка они составляют от 0.3 до 0.5 метров. В период ледообразования и при зажорах уровень воды может подниматься на 1 метр и более.

Зимняя межень устанавливается с конца ноября до середины декабря и заканчивается с наступлением весеннего половодья. В мягкие зимы уровень воды может подниматься до 0.5 – 0.8 м из-за сильных оттепелей. Самые низкие уровни воды обычно наблюдаются в феврале-марте.

Основной сток рек региона происходит в период весеннего половодья, на долю которого приходится около 50% объема годового стока, на зимнюю межень – 15 – 29%, на летне-осенний период – 28 – 35%.

Максимальный сток наблюдается весной, в период наиболее интенсивного притока талых вод. Минимальный сток тесно связан с подземным стоком, что определяет его величину и характер распределения.

Лед на реках Карельского перешейка обычно образуется в начале декабря, а притоки Невы замерзают в конце ноября – начале декабря. Забереги формируются в середине ноября и держатся 5 – 10 дней, а в отдельные годы до месяца.

Осеннего ледохода обычно не бывает, но редко ледоходы продолжительностью 1 – 12 дней наблюдаются на притоках Невы.

В период ледостава на участках с порогами образуется большое количество шуги и донного льда, который перекрывает все живое сечение рек и образует зажоры. К концу зимы толщина льда на реках может достигать от 40 до 60 сантиметров, а в суровые зимы – 80 – 100 сантиметров.

#### 1.4.1 Река Нева

Река Нева вытекает из Шлиссербургской губы Ладожского озера, впадая в Невскую губу Финского залива. Река представляет собой мощный, но короткий водоток длиной 74 км. Площадь водосбора Невы составляет 281000 км<sup>2</sup>, большая часть которой находится в Карелии. Бассейн Невы занимает 1.8% от общей площади водосбора. Река имеет обширную долину, которую обычно называют

Приневской низменностью. Ее ширина составляет 35 – 50 км. В отличие от других рек, Нева не имеет поймы, ее берега высокие и постепенно понижаются от истока к устью. Общее падение реки небольшое, около 5 метров, а средний уклон составляет 0.07‰. В среднем течении Нева пересекает известняковые гряды, образуя Ивановские пороги. Средняя ширина реки составляет от 400 до 600 метров, глубина от 8 до 11 метров, средняя скорость потока – 0.7 – 1.0 м/с. Среднегодовой расход воды составляет 2500 м<sup>3</sup>/с. В устье Нева распадается на многочисленные рукава и протоки, образуя дельту площадью около 45 км<sup>2</sup> и речную сеть, состоящую из 65 естественных русел и каналов.

Река Нева имеет особый гидрологический режим с высокой степенью естественной зарегулированности, которая напрямую зависит от колебаний уровня воды в Ладожском озере. Река Нева отличается высокой водностью и является четвертой по объему стока рекой европейской части России. Весеннее половодье на Неве носит умеренный характер, с относительно медленным подъемом и очень медленным спадом, и длится до начала весеннего половодья следующего года. Наводнения, иногда катастрофические, происходят в устье реки. Уровень воды колеблется под воздействием сгонно-нагонных явлений со стороны Финского залива. Подъем уровня воды из-за них может достигать 2.5 – 3.5 метров над ординаром. Отмечается, что все крупные наводнения на Неве сопровождаются ураганными ветрами (до 35 – 42 м/с), которые порождают большие волны. Чаще всего наводнения происходят осенью: в октябре и ноябре, иногда в сентябре и декабре. Распределение наводнений варьируется от года к году. Закономерности или периодичности в распределении по годам нет, наводнения могут отсутствовать в один год и повторяться в другой.

Продолжительность весеннего ледохода на реке Неве составляет в среднем 18–20 дней, обычно через три-пять дней после вскрытия наступает четырех-шестидневный период открытого русла. После этого вскрывается Ладожское озеро и по реке проходит озерный лед в среднем восемь-двенадцать дней.

#### 1.4.2 Река Луга

Река Луга – самая длинная река в Ленинградской области. Ее общая протяженность составляет 358 километров от истока в Тесово-Нетыльских болотах до Финского залива. Первые 86 километров протекают по территории Новгородской области. Площадь водосбора – 12800 км<sup>2</sup>. Среднегодовой расход составляет 100 м<sup>3</sup>/с. Четверть этого объема приходится на крупнейший приток – реку Оредеж.

В бассейн Луги входят все крупные озера и реки юго-запада Ленинградской области. Количество правых притоков гораздо больше, чем левых. На левом берегу в Лугу впадают всего три реки: Саба, Долгая и Славянка. Вода правых притоков, где преобладает питание грунтовых вод, гораздо холоднее вод левых притоков.

В верхнем течении Луга течет по низким заболоченным берегам, но далее чередуются изрезанные лесом берега с небольшими песчаными пляжами и лугами. У деревни Толмачево долина реки простирается на 2 километра и подвергается сильному затоплению во время весеннего половодья. Выше по течению река образует крутые петли по широкому дну долины, и как в следствие имеется большое количество стариц. Ниже по течению долина сужается, а берега становятся выше.

Выше по течению от пристани Хилок, где Луга прорезает известняк, начинаются Сабские пороги, достигая в длину более 5 километров. Во время летней межени глубина реки в этих местах не превышает 0.1 – 0.5 метра. После Сабских порогов идут Стронские длиной 2.5 километра, затем Пореченские и Кингисепские. После них, берега Луги понижаются, и ширина реки у устья достигает 400 метров.

Для Луги, как незарегулируемой реки, характерны большие колебания уровня воды. В верхнем течении, у Луги, во время весеннего половодья расход может превышать среднегодовой в 20 раз.

В нижнем течении, у Кингисепы, максимальный зафиксированный расход воды составляет 1190 м<sup>3</sup>/с, а минимальный – 2.95 м<sup>3</sup>/с. Амплитуда колебаний

уровня воды в реке Луга достигает 7.42 м у Кингисеппа и 7.87 м у деревни Толмачево.

На уровень воды в реке влияют погодные изменения. В районе села Большое Куземкино весной из-за дождей уровень может подниматься до 40 см выше среднего уровня весеннего половодья. В обычные по водности года, в июне уровень воды у Кингисеппа обычно поднимается выше нуля поста до 70–80 сантиметров.

Зимой на Луге часто случаются заторы и зажоры, особенно у Кингисеппа и у села Большое Куземкино. Наивысшего уровня река достигает во время весеннего половодья.

#### 1.4.3 Река Нарва

Река Нарва на 3 км длиннее Невы, а площадь водосбора занимает 56200 км<sup>2</sup>, но большая часть ее бассейна находится за пределами Ленинградской области. Река протекает на границе России и Эстонии. Река Плюсса, крупнейший правый приток Нарвы. Среднегодовой расход воды в устье Нарвы составляет 405 м<sup>3</sup>/с.

Из Чудского озера она впадает в Финский залив, преодолевая Омутинские пороги на расстоянии 8 километров далее переходя в Нарвские пороги. После них берега Нарвы становятся ниже, в месте впадения реки Россонь в Нарву ее ширина увеличивается примерно на 300 метров, но возле устья сужается до 170 метров.

Ледовый режим до 1955 года был катастрофическим, так как мощные зажоры возле Нарвских порогов сопровождалась сильными подъемами воды, затопляя районы Нарвы и ее пригородов. После возведения ГЭС, пороги скрылись, образовав Нарвское водохранилище. Благодаря этому, зажоры уменьшились в районе города Нарвы, но участились у Омутинских порогов, вызывая подъемы воды в близлежащих районах. Зажоры в Нарве могут возникать в ее истоке из озера. Происходит это по нескольким причинам: внезапное и резкое похолодание, наличие сильных ветров и зарастание истока, благодаря чему происходит нагон шуги из озера и ее последующая задержка растительностью.

Нарва протекает через промышленные районы Ленинградской области, где располагаются области добычи горючих сланцев, их обработки и цементный завод. Такая повышенная антропогенная нагрузка вносит свою долю в загрязнение реки.

#### 1.4.4 Река Селезневка

Река Селезневка является трансграничной рекой, вытекая из озера Хаапаярви, которое находится на территории Финляндии, близ Лаппеэнранты. Впадает Селезневка в Выборгский залив Балтийского моря, недалеко от одноименного поселка. Площадь водосбора 623 км<sup>2</sup>, длина реки 53 километра, 20 из которых приходится на российскую сторону. Средняя ширина реки около 20 метров, среднегодовой расход воды – 4.6 м<sup>3</sup>/с. Река Гусиная, являясь правым притоком Селезневки впадает в 3.9 километра от ее устья, на левом берегу впадает река Бусловка в 15 км от устья, а также река Малая Липовка. Русло реки протекает по району Карельского перешейка, который является частью Балтийского кристаллического щита. Рельеф пересеченный, с выходами множества скальных выступов и озер.

Почвы преимущественно бедные гумусом и сильнокислые. На низменностях и равнинах встречаются торфяные и болотные почвы.

Река Селезневка замерзает в первой декаде декабря и вскрывается в первой декаде апреля. Река в основном имеет смешанное питание с преобладанием снегового. Берега реки крутые и высокие, редко низкие, а в нижнем течении – обрывистые.

После пересечения границы между Россией и Финляндией скорость течения достигает 0.2 м/с. Ниже детского лагеря отдыха ширина реки составляет 15 метров, глубина – 2 метра, дно сложено твердыми породами. После поселка Лужайка скорость течения составляет 0,3 м/с, ширина – 21 метр, глубина – 2.1 метра, дно песчаное. У поселка Селезнево ширина реки достигает 24 метров, глубина 2.7 метра, дно песчаное.

## 1.5 Климат

Климатические особенности рассматриваемого региона формируются под воздействием умеренно континентального климата с отчетливым морским влиянием вдоль побережья Финского залива, где взаимодействуют воздушные потоки арктического, атлантического и континентального происхождения. Мягкая зима с частыми оттепелями и повышенной влажностью сменяется умеренно теплым летним периодом.

Температурный режим характеризуется минимальными значениями в январе-феврале, достигающими минус 8°C согласно многолетним наблюдениям, максимальные показатели фиксируются в июле, составляя 18°C. Значения многолетней среднемесячной температуры воздуха по данным метеостанций приведены в таблице. График многолетнего среднемесячного хода температуры воздуха приведен на рисунке. В таблице 1.1 приведены сведения о среднемесячной и среднегодовой температуре воздуха по основным метеостанциям региона, на рисунке 1.1 – приведен многолетний среднемесячный ход температур по метеостанциям.

Таблица 1.1 – Средние многолетние значения месячной и годовой температуры воздуха (°C) по данным метеостанций

Метеостанция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XI	год
Санкт-Петербург	-8.2	-7.7	-3.8	2.9	9.6	15.1	17.9	16.3	11.0	4.9	-0.7	-5.5	4.3
Выборг	-7.5	-7.9	-3.9	2.4	9.6	14.9	17.8	15.9	10.7	4.9	-0.3	-4.7	4.3
Гдов	-6.5	-6.7	-2.9	4.1	10.7	15.3	17.7	16.3	11.6	5.9	0.6	-3.8	5.2
Белогорка	-7.9	-7.9	-3.5	3.5	10.1	14.6	17.0	15.3	10.2	4.5	-0.8	-5.1	4.2

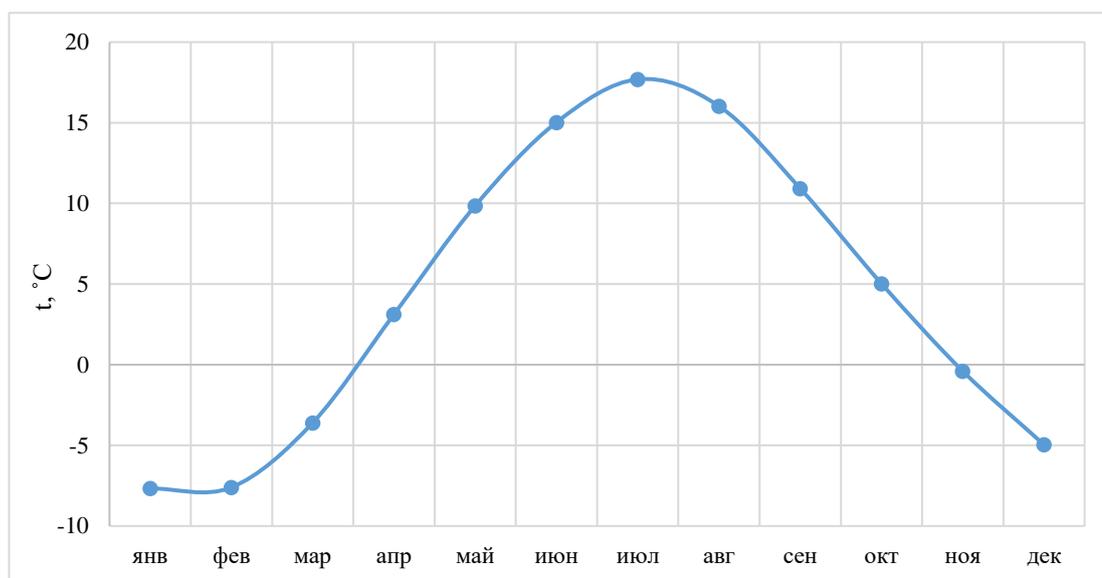


Рисунок 1.1 – Многолетний среднемесячный ход температур по метеостанциям Санкт-Петербург, Выборг, Гдов и Белогорка

Среднегодовое количество атмосферных осадков колеблется в диапазоне 640 – 710 мм, преимущественно выпадая в летний период. Многолетние значения месячных сумм осадков по данным метеостанций приведены в таблице 1.2. График многолетнего месячного распределения сумм осадков приведен на рисунке 1. 2.

Таблица 1.2 – Средние многолетние значения месячных и годовых сумм осадков (мм) с поправками на смачивание по данным метеостанций

Метеостанция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XI	год
Санкт-Петербург	43	35	36	36	43	62	82	85	63	67	58	51	662
Выборг	50	41	42	37	41	56	71	80	75	77	73	66	708
Гдов	39	31	31	36	46	67	72	84	64	63	56	46	635
Белогорка	42	33	36	40	49	68	80	84	65	66	60	54	677

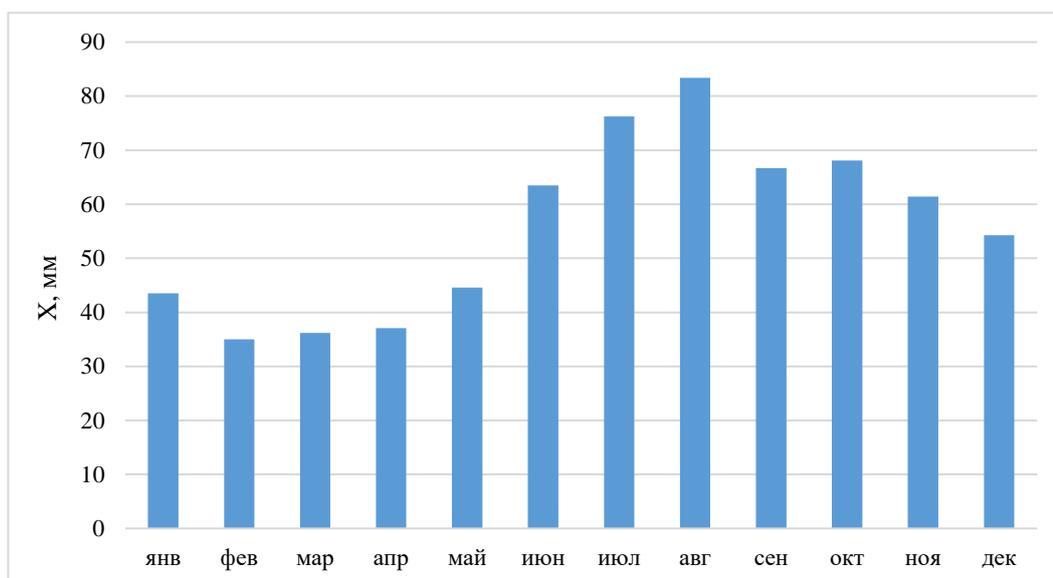


Рисунок 1.2 – Многолетнее месячное распределение сумм осадков по метеостанциям Санкт-Петербург, Выборг, Гдов и Белогорка

## 1.6 Гидрометеорологическая изученность

Санкт-Петербург и Ленинградская область являются одними из наиболее изученных в гидрометеорологическом плане регионов России в связи с их географическим положением, наличием крупных водных объектов, высокой плотностью населения и развитой промышленной, транспортной инфраструктур.

Река Нева является главной водной артерией Санкт-Петербурга, вследствие чего требуется тщательный контроль за ее режимом. Всего установлено 5 постов, которые отображены на рисунке 1.3.

Следующей по изученности рекой является Луга. Является одной из самых значимых в Ленинградской области и наличие постов в разных ее частях (рисунок 1.4) позволяет анализировать ее гидрологический режим в верхнем, среднем и нижнем течениях.

На реке Селезневка установлено 2 поста, что свидетельствует о наблюдениях в рамках местной гидрологической сети (рисунок 1.5). Учитывая то, что река малая, ее мониторинг ограничивается базовыми параметрами.

На реке Нарва по данным сайта АИС ГМВО [10] установлен только 1 гидрологический пост, который отображен на рисунке 1.6.

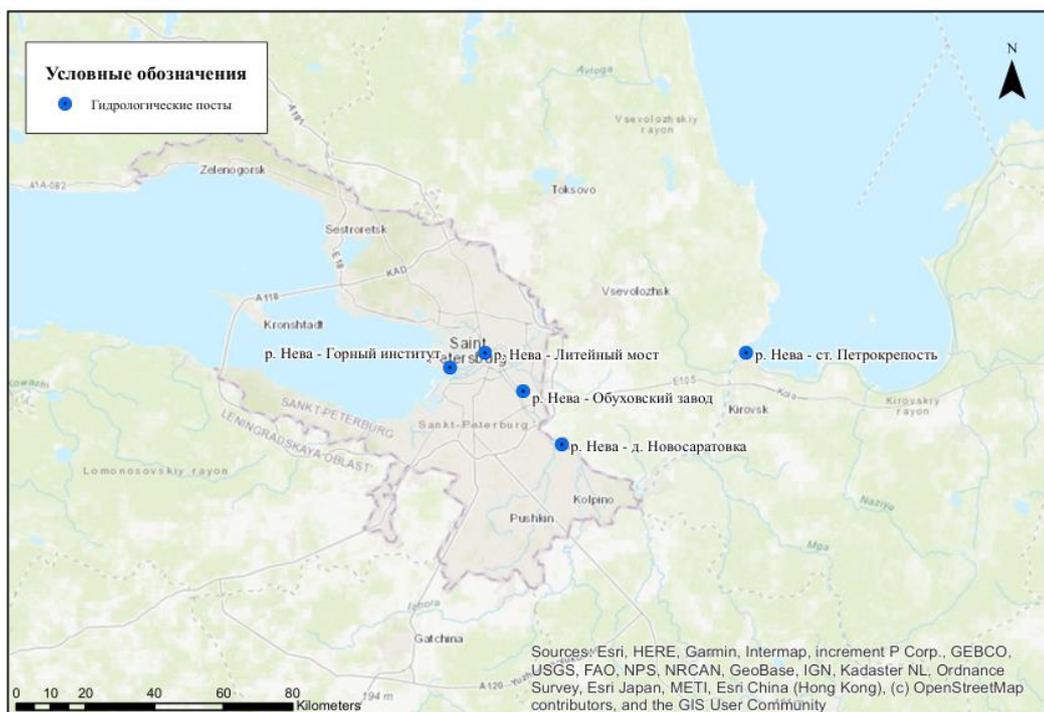


Рисунок 1.3 – Карта расположения гидрологических постов на р. Нева

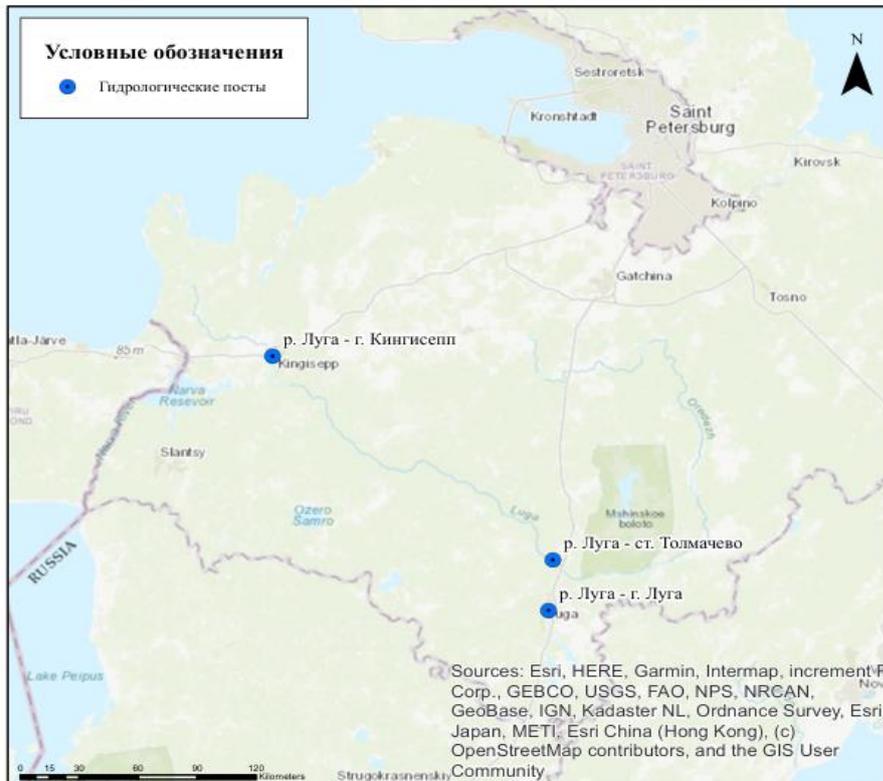


Рисунок 1.4 – Карта расположения гидрологических постов на р. Луга

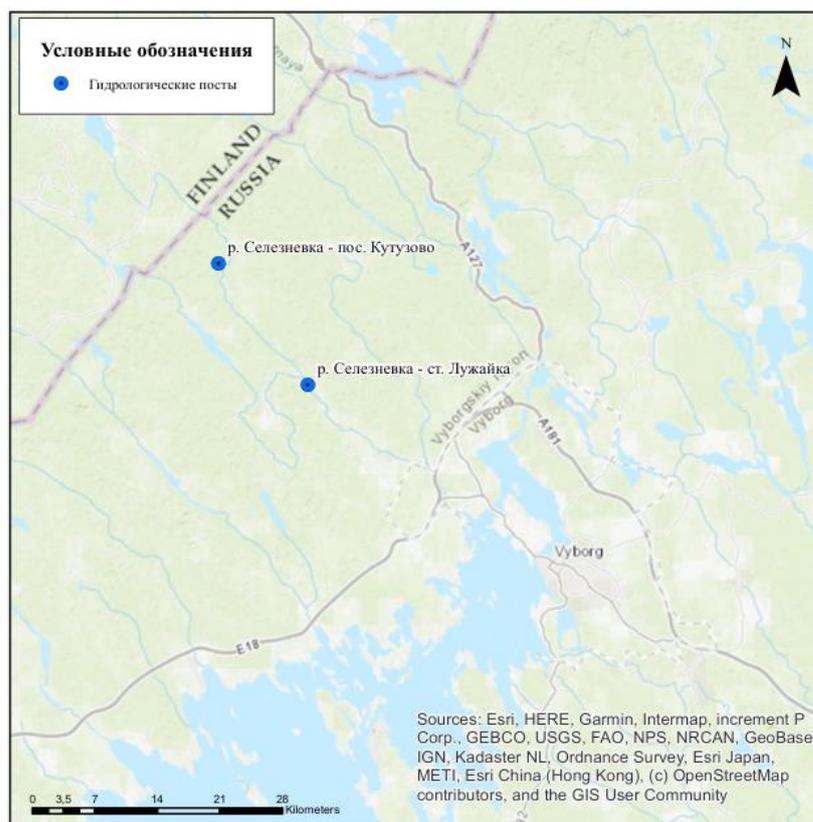


Рисунок 1.5 – Карта расположения гидрологических постов на р. Селезневка



Рисунок 1.6 – Карта расположения гидрологических постов на р. Нарва

## 2 Обзор литературы в области оценки изменения биогенной нагрузки на бассейн

### 2.1 Организация HELCOM

В результате подписания Хельсинской конвенции в 1992 году была образована комиссия по защите морской среды района Балтийского моря (сокращенно ХЕЛКОМ) для разработки методов над сокращением поступления биогенных веществ в бассейн Балтийского моря.

С момента ее образования организовывается мониторинг с целью сбора информации об источниках и количестве поступающих загрязняющих веществ в Балтийское море. Регулярно собирая и предоставляя данные, ХЕЛКОМ может отслеживать прогресс в достижении политически согласованных целей по их снижению.

2007 году прибрежные страны Балтийского моря и Европейский Союз приняли План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю (BSAP). Общая цель которого – достижение хорошего экологического состояния Балтийского моря путем решения проблем эвтрофикации, опасных веществ, биоразнообразия и морской деятельности. План был обновлен в 2021 году, где определяются новые комплексы мер, которые должны быть реализованы договаривающимися сторонами Хельсинкской конвенции к 2030 году и направлен на достижение хорошего экологического состояния Балтийского моря к концу этого периода. Устанавливаются предельно допустимые поступления питательных веществ в качестве ключевых экологических целей для достижения хорошего экологического статуса с точки зрения эвтрофикации, полученные в результате модельных расчетов, проведенных Baltic Nest Institute (BNI) в Швеции. План действий также утверждает верхние пределы поступления питательных веществ (ППВ) для всех стран Балтийского моря.

Страны-участники Плана действий по Балтийскому морю обязаны предоставлять данные мониторинга для более эффективного решения поставленных

задач. Для этого необходимо поддерживать и расширять программы и сети мониторинга, стремясь к наиболее точным методам для оценки загрязнения. Поскольку значительное количество биогенных веществ поступает в Балтийское море через трансграничные территории, укрепление сотрудничества с ведомствами управления речными бассейнами, включая страны, не входящие в ХЕЛКОМ, позволит расширить знания о граничном стоке и разработать наиболее эффективные меры по их снижению.

ПДБМ-2021 [3] призывает страны ХЕЛКОМ представлять отчет с максимально подробным перечислением запланированных и реализованных мер в различных районах и водосборных бассейнах, а также оценку их эффективности.

## 2.2 Сценарии SSP и RCP

Данные методы освещают анализ влияния социально-экономических и климатических изменений на биогенную нагрузку (азот и фосфор) в Балтийском море до 2100 года. Применяется комбинация глобальных сценариев SSP (Общие социально-экономические пути) и климатических сценариев RCP (Репрезентативные пути концентрации), чтобы спрогнозировать изменения в поступлении питательных веществ от точечных и диффузных источников. Распространение сценария на весь район Балтийского моря производится с помощью крупномасштабного сценария E-NYPE гидрологической модели с суточным шагом по времени.

Процесс построения долгосрочных прогнозов биогенной нагрузки состоит из четырех этапов. Первый этап заключается в инвентаризации существующих источников загрязнения и определение экономических секторов, групп потребителей, ответственных за выбросы азота и фосфора в водную среду. В случае Балтийского моря внешняя нагрузка азотом и фосфором хорошо отслеживается и регистрируется с 70-х годов прошлого века.

Второй этап – выявление антропогенных и природных факторов, которые влияют на производственные процессы и интенсивность загрязняющих территорий.

Глобальные социально-экономические факторы, такие как рост населения, урбанизация и изменение структуры потребления, представляют собой конечные движущие силы изменений, определяющие спрос на различные товары и услуги, управление и инвестиции в инфраструктуру и в конечном итоге определяют степень изменения климата в глобальном масштабе.

Местные и региональные факторы, а также глобальные тенденции в потреблении определяют интенсивность и масштабы сельскохозяйственного производства и других загрязняющих отраслей промышленности, а также определяют управленческие усилия и инвестиции в технологии снижения загрязнения.

Изменения в очистке, землепользовании и технологические разработки в сельском хозяйстве были определены как наиболее важные факторы неточечного поступления питательных веществ. Продвижение технологий очистки сточных вод и пространственное распределение населения являются основными факторами загрязнения из точечных источников. Содержание азота в атмосфере зависит от численности скота и технологий переработки навоза, применяемые в регионе, а также глобальный технологический переход в процессах сжигания ископаемого топлива и биотоплива в транспорте, производстве электроэнергии и отоплении.

После определения источников и факторов загрязнения, третьим шагом является подготовка прогнозов для основных факторов в пространственном и временном масштабах, соответствующих загрязняющим секторам и природным процессам. В исследовании используется база данных IIASA SSP (Международного Института Прикладного Системного Анализа), содержащая прогнозы численности населения, урбанизации, экономического и технологического развития, а также региональные расширенные описания общих социально-экономических путей (SSP) для секторов, вызывающих развития, а также расширенные на

региональном уровне описания SSP для секторов, вызывающих выбросы питательных веществ.

Кроме того, разрабатывались и применялись модели для дезагрегации населения и изменения землепользования в пространственном и временном разрешении, актуальном для загрязняющих территорий. Чтобы учесть влияние изменения климата в прогнозе по питательным веществам, были разработаны климатические сценарии для водосборного бассейна Балтийского моря.

Четвертый, и последний, шаг – разработка и адаптация моделей, использующие прогнозы движущих сил в качестве исходных данных, и разрабатывают секторальные прогнозы биогенной нагрузки.

Уменьшение масштабов климатических сценариев:

Производилось моделирование для двух репрезентативных концентрационных путей:

- RCP4.5, который представляет собой сценарий умеренного изменения климата;
- RCP8.5, сценарий сильного изменения климата.

Чтобы оценить вероятное последствия изменения климата на биогенную нагрузку из неточечных источников. Также применялись результаты четырех альтернативных моделей общей циркуляции, подготовленных для периода 1976 – 2098 гг. Эти прогнозы были уменьшены для района водосбора Балтийского моря с помощью региональных климатических моделей RCA4 (Региональная климатическая модель), WRF (Исследование и прогнозирование погоды) и REMO (Региональная модель), применяемых для Европы и части Северо-Восточной Атлантики.

Гидрологическая модель E-HYPE была использована для расчета последствий изменения климата, в частности вариантов временного и пространственного распределения осадков на биогенную нагрузку, поступающей с водосборов в Балтийское море. Другие входные данные модели и исходные данные, такие как: землепользование и распределение культур, уровень удобрений, сбросы из точечных источников и атмосферные осадения были сохранены в изначальных

значениях. Неточечные источники питательных веществ в Балтийское море были объединены по дренажным бассейнам в годовом масштабе за период 2010 – 2098 гг. и предполагая, что климатическая изменчивость 2080 – 2098 годов остается неизменной для двух последних лет моделирования (2099 – 2100 гг.). Изменение определялось по сравнению с эталонным периодом (2010 год).

Моделирование источников загрязнения:

Для точечных источников (коммунальные и промышленные стоки) моделирование основывается на прогнозах численности населения, уровня урбанизации и технологий очистки сточных вод. Помимо этого, учитываются изменения в рационе питания, которые влияют на количество азота и фосфора в сточных водах. Технологии очистки в этом случае классифицируются на первичные, вторичные и третичные, с учетом инвестиций и экономического роста.

Для диффузных источников (сельское хозяйство и другие виды землепользования) используется модель, учитывающая изменения в землепользовании (пашня, пастбища, леса и т.д.), эффективность использования удобрений (NUE) и климатические факторы. Важными драйверами являются спрос на продукты питания, международная торговля и технологические инновации в сельском хозяйстве. Также учитывается влияние осадков и температуры на вымывание питательных веществ.

Что касается атмосферных осадений, то основное внимание уделяется выпадениям оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) и аммиака ( $\text{NH}_3$ ), связанных с энергетикой, транспортом и животноводством. Прогнозы основываются на глобальных тенденциях выбросов и изменениях в животноводстве.

В результате, моделирования показывают, что социально-экономические факторы (например, спрос на продукты питания) оказывают большее влияние на поступление питательных веществ, чем климатические изменения. Анализ чувствительности для различных сценариев позволяет оценить диапазон возможных изменений нагрузки биогенных элементов (от 52% до 115% от исходного уровня к 2100 году). Особое внимание уделено суббассейнам Балтийского моря, таким как Финский залив и Рижский залив, где наблюдаются наибольшие изменения.

Однако, существуют ограничения и неопределенности. Например, интерпретация SSP, где существует возможность различных трактовок сценариев, что может расширить диапазон результатов. Неопределенность климатических моделей дает варьирующиеся прогнозы осадков и температуры. Процессы вымывания фосфора менее изучены, что снижает точность прогнозов для этого элемента. И одно из самых главных, нет учета экстремальных событий (например, наводнения), которые могут резко увеличить биогенный сток.

## 2.3 Статистические аспекты обработки данных в рамках проекта HELCOM PLC-8

### 2.3.1 Обработка пропущенных данных и выбросов

Надежность всех статистических методов и статистических анализов, например, нормализация временных рядов поступления питательных веществ и анализ тенденций временных рядов, значительно повышается при проведении первоначального исследования и анализа качества данных. Качество данных обеспечивается путем проверки данных на наличие пробелов, т.е. отсутствующих значений, и подозрительных значений, т.е. выбросов. При исследовании подозрительных значений данные проверяются на наличие аналитических ошибок или ошибок в процессе хранения данных, а также на соответствие с ранее представленными данными и данными из других сопоставимых источников, а также на предмет ошибок при их переносе между базами данных.

Для восполнения пробелов в данных существует несколько различных общих методов. В зависимости от типа, любой из следующих методов может быть применен для заполнения пропусков:

- Среднее значение статистического распределения. Распределение определяется либо путем включения всех соответствующих данных по данному водосборному бассейну, либо на основе более короткого временного ряда, например, при оценке недостающих данных по точкам источников в начале или конце временного ряда.

- Среднее значение соседних величин. Если  $x_a$  и  $x_c$  принимаются как два временных ряда значений с отсутствующим  $x_b$ , то:

$$x_b = \frac{x_a + x_c}{2}, \quad (2.1)$$

- Линейная интерполяция. Если  $x_a$  и  $x_b$  воспринимаются как два соседних значения в  $n$  недостающих значений, то  $k^{\text{th}}$  недостающее значение (из  $x_a$ ) может быть определено как:

$$x_k = x_a + k \cdot \frac{x_b - x_a}{n+1}, \quad (2.2)$$

- Регрессионная модель. Если известен сток и можно установить хорошую зависимость между поступлением питательных веществ и стоком, это может быть использовано для оценки недостающих значений.
- Модельные оценки неконтролируемых поступлений с водосбора, если это возможно - в противном случае, поступления можно оценить по данным соседних водосборов с аналогичными условиями.

Выбросы – это значения данных, которые являются экстремальными по сравнению с другими представленными значениями для той же местности (страны, бассейна, водосбора и т.д.) и могут быть определены только с помощью формальных тестов на выбросы, например:

- Тест Диксона на 4 сигмы ( $\sigma$ ): Выбросы – это значения за пределами интервала, состоящие из среднего  $\pm 4$  разового стандартного отклонения.
- Диаграмма "box and whisker". Графический способ представления распределения числовых данных через их квантили.
- Основанное на опытах определение максимальных и минимальных значений, которые не могут быть превышены или опущены ниже.

- Стандарты качества воды (интервальные значения или пределы), если такие имеются.

### 2.3.2 Неопределенность исходных данных (ежегодные поступления от конкретной страны или района)

Общая неопределенность (смещение плюс вариация) представляет собой чрезвычайно сложную сумму (основанная на определенных допущениях) ряда различных компонентов неопределенности: погрешности измерений стока, лабораторных анализов, пробоотбора, климатической вариативности и модельных оценок для не мониторинговых территорий.

Гидрологическая нормализация поступающих питательных веществ:

Годовые поступления питательных веществ из рек сильно различаются между годовыми поступлениями питательных веществ в реки, наблюдаются значительные колебания между исследуемыми годами. Основной причиной этого являются колебания стока, которые в основном обусловлены влиянием погоды на такие факторы, как осадки, включая накопление и таяние снега/льда, испарение, а также температура и т.д. Чтобы устранить основную часть вариаций, вносимых этими факторами, годовые поступления питательных веществ нормируются по стоку. Также нормировка не должна применяться к поступлениям из точечных источников, сбрасывающихся непосредственно в море, и необходимо вычесть основные точечные источники перед нормализацией речного стока. После нормализации добавляются нагрузки от вычтенного точечного источника.

Гидрологическая нормализация должна рассматриваться как необходимое условие для анализа трендов. Анализ трендов представляет собой двухэтапный процесс, включающий: 1) нормализацию и 2) анализ трендов.

Эмпирический гидрологический метод нормализации должен быть основан на линейной зависимости между годовым стоком ( $Q$ ) и годовой нагрузкой ( $L$ ) биогенного вещества:

$$L_i = \alpha + \beta \cdot Q_i + \varepsilon_i, \quad (2.3)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры, связанные с линейной регрессией,  $\varepsilon_i$  – ошибка модели в линейной регрессии.

Затем, нормализованная нагрузка рассчитывается как:

$$L_{Ni} = L_i - (Q_i - \bar{Q}) \cdot \hat{\beta}, \quad (2.4)$$

где  $\bar{Q}$  – средний сток за весь период временного ряда,

$Q_i$  – сток за год,  $\hat{\beta}$  – указывает, что это оценочный параметр.

Обычно эта зависимость моделируется после логарифмического преобразования, что уменьшает влияние больших нагрузок и значений стока, и дает несколько более точное соответствие с остатками, которые, скорее всего, имеют распределение Гаусса, что является статистической предпосылкой для метода регрессии. Таким образом, нормализация должна быть основана на логарифмической регрессии между нагрузкой и стоком:

$$\log L_i = \alpha + \beta \cdot \log Q_i + \varepsilon_i. \quad (2.5)$$

Чтобы избежать больших отрицательных значений при логарифмическом преобразовании очень малых значений нагрузки или стока предлагается умножить нагрузку и сток на 1000 перед преобразованием.

Метод дифференцирования временного ряда. Представляет собой преобразование временного ряда, используемый для стабилизации среднего значения временного ряда. Таким образом, для всех лет ( $i, i=2, \dots, n$ ), мы вычисляем  $L_i - L_{i-1}$  и  $Q_i - Q_{i-1}$  и подгоняем модель

$$L_i - L_{i-1} = \alpha + \beta \cdot (Q_i - Q_{i-1}) + \varepsilon_i. \quad (2.6)$$

Эта модель, как правило, приводит к гораздо более адекватному распределению остатков модели по времени.

Гидрологическая нормализация должна проводиться по рекам/водосборам, т.е. биогенная нагрузка должна быть нормализована для каждой реки/водосбора отдельно. Если нормализация выполняется в масштабах страны или суббассейна, результат не будет таким же, как нормализованные по водосбору.

### 2.3.3 Анализ тенденций, точек изменения и их оценка

Метод Манна-Кендалла является известным методом для проверки наличия монотонной тенденции во временном ряду. Он является непараметрическим и основан на тау Кендалла, который является мерой корреляции между двумя различными переменными. Метод устойчив к выбросам и нескольким отсутствующим данным. Если тенденция линейна, метод Манна-Кендалла имеет несколько меньшую мощность, чем обычный регрессионный анализ.

Метод трендов Манна-Кендалла используется для предварительного анализа возможных тенденций во временных рядах нагрузки азота и фосфора. Кроме того, метод Манна-Кендалла используется для анализа возможных тенденций во временных рядах стока. Повторный анализ трендов, как оценка линии тренда (наклон, пересечение и т.д.), основан на линейной регрессии и параметрическом тестировании.

Последовательная корреляция во временном ряду может быть проверена с помощью теста Дарбина-Уотсона.

Оказалось, что автокорреляция для годовых временных рядов нагрузки или стока мала и ею можно пренебречь. Таким образом, методы можно использовать без модификаций в качестве приближения. Минимальная длина временного ряда для применения теста Манна-Кендалла составляет 8 лет, и это также можно использовать как руководство для применения обычной линейной регрессии.

Анализ тренда Манна-Кендалла и обычная линейная регрессия позволяют выполнить односторонний тест на тренд, если основное внимание уделяется проверке убывающего или возрастающего развития во временном ряду.

### 2.3.4 Проверка выполнения целей BSAP

Проверка для временных рядов без значимого тренда:

Если временной ряд не имеет значимого тренда, используется метод, основанный на среднем значении и стандартной ошибке:

- Нулевая гипотеза ( $H_0$ ): Цель не достигнута (среднее поступление больше целевого значения).
- Альтернативная гипотеза ( $H_a$ ): Цель достигнута (среднее поступление меньше целевого значения).

Проверка временных рядов со значимым трендом:

Рассматривается на нескольких моделях, основанных на моделях с 1 точкой изменения  $Y$ . Первый пример представляет собой модель с одной точкой изменения, линейной моделью «до» и «после» и отсутствием изменений в уровне до и после точки изменения. Второй аналогичен первому, но с изменением уровня в точке изменения. Третий пример рассматривается с постоянным уровнем после изменения.

Система «светофора»:

С помощью нее можно определить достигла ли страна или суббассейн поставленной цели.

Красный: если расчетное нормализованное поступление за последний год или среднее нормализованное поступление за рассматриваемый период (когда среднее нормализованное поступление веществ за рассматриваемый период при отсутствии тренда) выше целевого значения  $T$ .

Желтый: если нулевая гипотеза целевого теста принимается, но расчетный нормализованный объем производства за последний год или средний за последний год, или среднее нормализованное значение за рассматриваемый период при отсутствии тренда ниже, чем целевое значение.

Зеленый: если нулевая гипотеза целевого теста отвергается, т.е. принимается альтернативная гипотеза. Гипотеза принята, значит, цель выполнена, а рас-

четное нормализованное потребление за последний год или среднее нормализованное значение за рассматриваемый период при отсутствии тренда ниже целевого значения.

#### 2.4 Анализ динамики биогенных элементов в переходных зонах

Исследование проводилось на литовской части Куршского залива, Клайпедском проливе и прибрежной зоне Балтийского моря. Северная часть Куршского залива соединяет лагуну с Балтийским морем через Клайпедский пролив, который характеризуется большой техногенной и антропогенной нагрузкой.

Полевые исследования проводились в ходе сезонных экспедиций (4 исследования в год) зимой (февраль), весной (май), летом (август) и осенью (ноябрь) 2007–2009 гг. и 2018–2020 гг. Забор воды производился: с трех площадок, расположенных в северной части Куршского залива, восьми площадках в Клайпедском проливе и трех в прибрежной зоне Балтийского моря. Места отбора проб выбирались таким образом, чтобы получить образцы из различных сред с разной соленостью и другими свойствами (залив, пролив и море).

Для расчета водного баланса и количества биогенных элементов (в данном случае общий показатель азота и фосфора) в Клайпедском проливе и в прибрежной зоне Балтийского моря, использовались сезонные данные с 2001–2020 гг. Для оценки водного баланса Куршского залива использовались данные за 2001–2020 гг.: речной сток, уровень воды в Куршском заливе, температура воздуха, количество осадков и продолжительность ледового покрова на Куршском заливе. Ежедневные данные с 6 гидрологических постов были использованы для расчета речного притока в Куршский залив.

Для расчета изменения объема использовались ежедневные данные об уровне воды в Ниде. Среднемесячное количество осадков, температура воздуха и продолжительность ледяного покрова на метеостанциях в Ниде и Клайпедке использовались для расчета количества осадков, выпавших в Куршском заливе, и испарения.

Элементы водного баланса Куршского залива (приток из Балтийского моря в Куршский залив и сток из него в Балтийское море) необходимы для оценки биогенного переноса в транзитной зоне залив-море. Водный баланс Куршского залива описывается уравнением:

$$(Q_R + P - E) + (Q_S - Q_L) = \Delta V, \quad (2.7)$$

где  $Q_R$  – речной приток в Куршский залив,

$P$  – осадки,

$E$  – испарение,

$Q_S$  – приток из Балтийского моря в Куршский залив,

$Q_L$  – сток из Куршского залива в Балтийское море,

$\Delta V$  – изменение объема в Куршском заливе.

Два компонента водного баланса ( $Q_L$ ,  $Q_S$ ) были использованы для расчета биогенных веществ из Куршского залива в Балтийское море и обратно.

Было выявлено, что на циркуляцию воды в Куршском заливе, особенно в его северной части влияют различия в уровнях воды между Куршским заливом и Балтийским морем. Интенсивность циркуляции объясняется проницаемостью пролива, которая прогрессивно увеличивается с углублением акватории Клайпедского порта.

Анализ взаимосвязей между различными параметрами проводили с помощью программы Statistica 8.0 (StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA). Анализ главных компонент (РСА) использовался для выявления факторов, связывающих переменные биогенных элементов и анализируемые показатели воды (температура  $T$ , соленость  $S$ , растворенный кислород  $O_2$ ) в Балтийском море и Куршском заливе, включая Клайпедский пролив. Для РСА-анализа использовались данные с 2018 по 2020 год, который позволил исследовать взаимосвязи и закономерности в данных, выделив ключевые компоненты, которые вносят вклад в общую изменчивость характеристик воды. Перед проведением РСА исходные данные проходят отцентровку по среднему значению и масштабированию.

## 2.5 ERGOM. 3D-экосистемная модель Балтийского моря

Модель основывается на Modular Ocean Model (MOM 2.2), охватывая всю акваторию Балтийского моря. В ней используется адаптивная сетка с высоким разрешением в юго-западной части, увеличивая шаг к северу и востоку. Вертикальная структура включает 12 слоев, которое обеспечивает точное моделирование процессов на разных глубинах. Открытая граница в районе пролива Скагеррак, позволяя учитывать взаимодействие с Северным морем.

Модель включает 10 переменных, например, аммоний, нитраты, фосфаты, кислород. Учитываются 11 ключевых процессов: фиксация азота, минерализацию, денитрификацию, нитрификацию, атмосферные осадки, седиментацию, а также дыхание и рост водорослей. Особое внимание уделяется циклу азота, который является лимитирующим фактором для первичной продуктивности в большинстве районов Балтийского моря. Она также учитывает и интегрирует данные по биогенной нагрузке от 15 крупнейших рек, которые рассматриваются как точечные источники, учитывая смешанные источники и осадки, что позволяет более реалистично оценить вклад различных стран в эвтрофикацию моря.

Однако, модель не учитывает некоторые виды фитопланктона и их жизнедеятельность, что может влиять на точность прогнозирования цветения водорослей. Также использование данных за 80-е годы XX века может некорректно отображать современные условия, особенно в направлении изменения климата и антропогенной нагрузки.

### 3 Расчет изменчивости биогенной нагрузки

#### 3.1 Исходные данные

Страны-участники плана действий по Балтийскому морю обязаны предоставлять данные мониторинга для более эффективного решения поставленных задач. С Российской стороны мониторинг за биохимическими показателями производится на 4 реках: Селезневка, Нева, Луга и Нарва (рисунки 3.1 – 3.2).

Данные по мониторингу находятся в открытом доступе на сайте HELCOM PLC-Water [8], где в нужных графах выбирается область мониторинга, страна, бассейн, биохимический показатель и диапазон наблюдений.

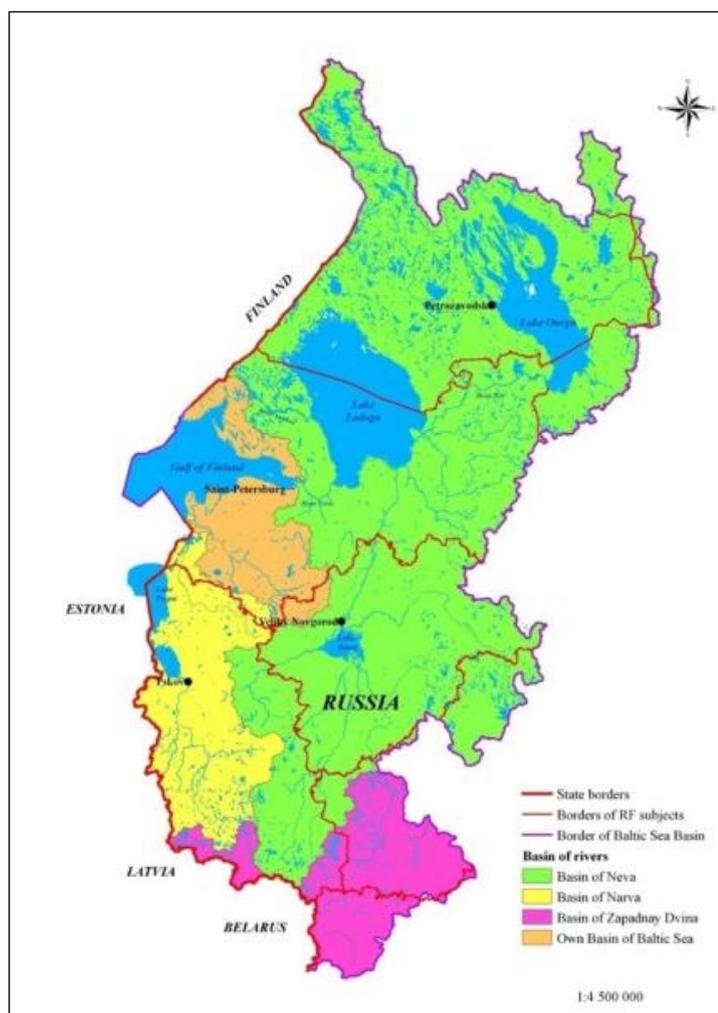


Рисунок 3.1 – Карта водосборов рек бассейна Балтийского моря

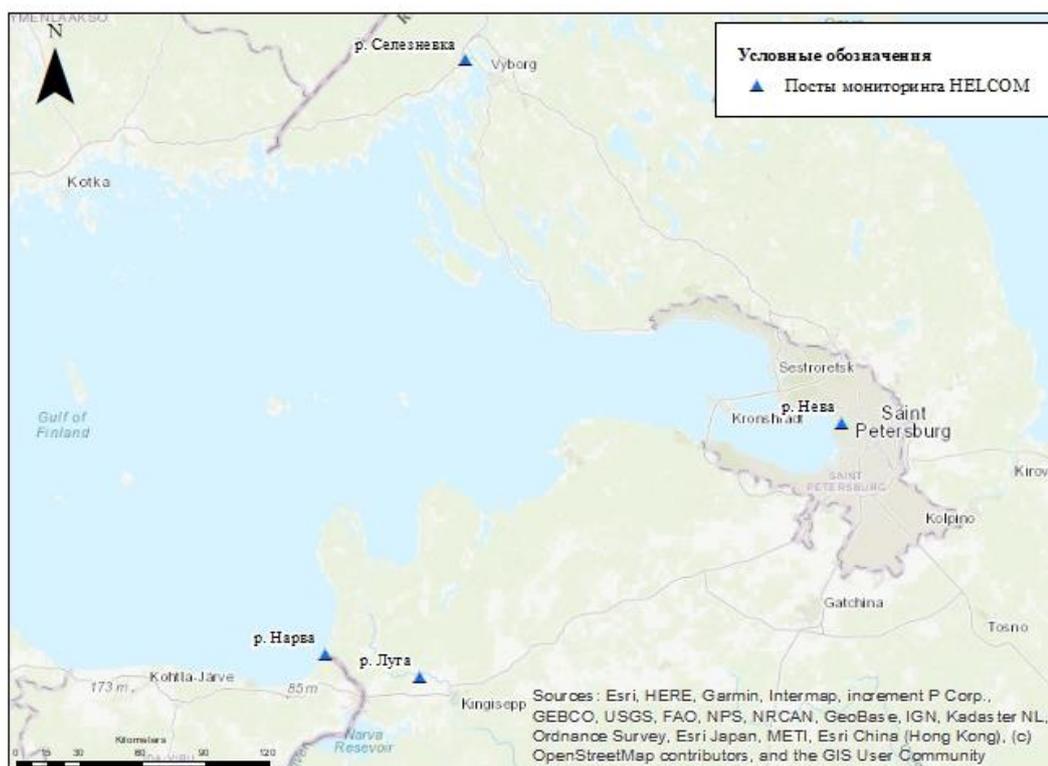


Рисунок 3.2 – Карта расположения постов мониторинга HELCOM

В качестве исходных данных были взяты концентрации основных биогенных показателей и тяжелых металлов: БПК<sub>5</sub>, БПК<sub>7</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N-NO<sub>2</sub>, P-PO<sub>4</sub>, NTOT, PTOT, Zn, Pb, Cu, Cd, Ni и расходу воды в периоды 1995 – 2023 гг.

Следует отметить, что на разных постах период наблюдений разный. Основная часть наблюдений велась примерно с 2000 года, имеются пропуски данных от 1 до 4 лет подряд. На всех постах отсутствуют данные по БПК<sub>7</sub> после 2012 года. На р. Селазневка данные по общему фосфору и азоту фиксировались с 2011 и 2014 годов соответственно. Все пропуски восстанавливались по формуле 2.2.

### 3.2 Оценка значимости трендов

Для оценки значимости трендов применялись классические статистические формулы. Тренд считается значимым, если выполняется условие:

$$R/\sigma_R > t_{2\alpha}, \quad (3.1)$$

где:  $t_{2\alpha}$  – стандартное значение статистики Стьюдента при уровне значимости  $2\alpha=5\%$  и числе степеней свободы  $(n-2)$ ;

$R$  – коэффициент корреляции;

$\sigma_R$  – стандартная ошибка, определяемая по формуле:

$$\sigma_R = \sqrt{(1 - R^2)/(n - 2)}. \quad (3.2)$$

В таблицах 3.1 – 3.4 представлены результаты проверки.

Таблица 3.1 – Оценка значимости трендов р. Селезневка

Элемент	n	R <sup>2</sup>	$\sigma_R$	$t_{2\alpha}$	R	R/ $\sigma_R$	R/ $\sigma_R > t_{2\alpha}$	Повышение/ понижение
БПК <sub>5</sub> , т/год	29	0,1261	0,180	2,05	0,36	1,97	не значим	+
БПК <sub>7</sub> , т/год	18	0,1394	0,232	2,12	0,37	1,61	не значим	-
N-NO <sub>3</sub> , т/год	29	0,548	0,129	2,05	0,74	5,72	значим	+
N-NO <sub>2</sub> , т/год	29	0,0575	0,187	2,05	0,24	1,28	не значим	+
P-PO <sub>4</sub> , мг/л	29	0,0153	0,191	2,05	0,12	0,65	не значим	-
НТОТ, т/год	10	0,012	0,351	2,31	0,11	0,312	не значим	+
РТОТ, т/год	13	0,0033	0,301	2,20	0,06	0,191	не значим	-
Расход, м <sup>3</sup> /с	29	0,2459	0,167	2,05	0,50	2,967	значим	+
Zn, т/год	10	0,019	0,350	2,31	0,14	0,394	не значим	+
Pb, т/год	29	0,0083	0,192	2,05	0,09	0,475	не значим	-
Cu, т/год	29	0,1406	0,178	2,05	0,37	2,102	значим	+
Cd, т/год	29	0,0014	0,192	2,05	0,04	0,195	не значим	+
Ni, т/год	10	0,0988	0,336	2,31	0,31	0,937	не значим	+

На реке Селезневка наблюдаются значимые тренды только по трем показателям: расходу воды, нитратному азоту (N-NO<sub>3</sub>) и концентрации меди. Такие результаты могут быть связаны с антропогенной нагрузкой, например, предпри-

ятием «Borenius», расположенное выше по течению в поселке Селезнево. Графики значимых трендов отображены на рисунке 3.1. Остальные материалы по данному посту представлены в Приложении А.

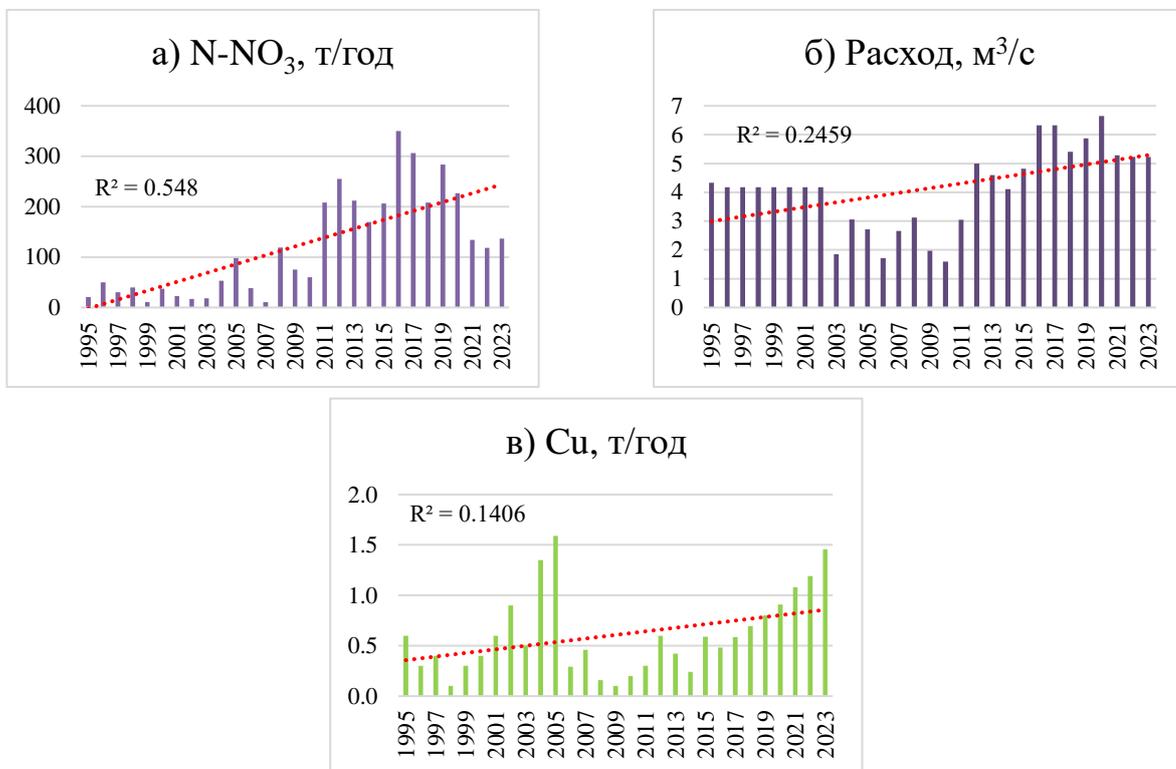


Рисунок 3.3 – Графики значимых трендов, р. Селезневка.

а) Нитратный азот (N-NO<sub>3</sub>), б) Расход воды, в) Концентрация меди.

Таблица 3.2 – Оценка значимости трендов р. Нева

Элемент	n	R <sup>2</sup>	$\sigma_R$	$t_{2\alpha}$	R	R/ $\sigma_R$	R/ $\sigma_R > t_{2\alpha}$	Повышение/понижение
БПК <sub>5</sub> , т/год	29	0,1204	0,180	2,05	0,35	1,92	не значим	-
БПК <sub>7</sub> , т/год	18	0,2056	0,223	2,12	0,45	2,03	не значим	+
N-NO <sub>3</sub> , т/год	29	0,0099	0,191	2,05	0,10	0,52	не значим	+
N-NO <sub>2</sub> , т/год	29	0,098	0,183	2,05	0,31	1,71	не значим	-
P-PO <sub>4</sub> , мг/л	29	0,0354	0,189	2,05	0,19	1,00	не значим	-
NTOT, т/год	24	0,176	0,194	2,07	0,42	2,17	значим	-
PTOT, т/год	29	0,2131	0,171	2,05	0,46	2,70	значим	-
Расход, м <sup>3</sup> /с	29	0,2274	0,169	2,05	0,48	2,82	значим	+
Zn, т/год	24	0,1688	0,194	2,07	0,41	2,11	значим	+
Pb, т/год	29	0,304	0,161	2,05	0,55	3,43	значим	-
Cu, т/год	29	0,141	0,178	2,05	0,38	2,11	значим	+
Cd, т/год	29	0,0543	0,187	2,05	0,23	1,25	не значим	-
Ni, т/год	21	0,0547	0,223	2,09	0,23	1,05	не значим	+

На графиках (рисунок 3.2) наблюдается значимое снижение концентраций общего фосфора, азота и свинца, повышение концентрации цинка, меди и расхода воды. Понижение можно связать с эффективными природоохранными мерами, таких как: модернизирование очистных сооружений или введение определенных ограничений по использованию фосфатов. Повышение концентраций металлов возможны из-за промышленных сбросов, однако, это нельзя утверждать наверняка и для этих показателей требуется дополнительный мониторинг. Рост расхода воды происходит из-за климатических изменений. Графики других биогенных показателей отображены в Приложении Б.

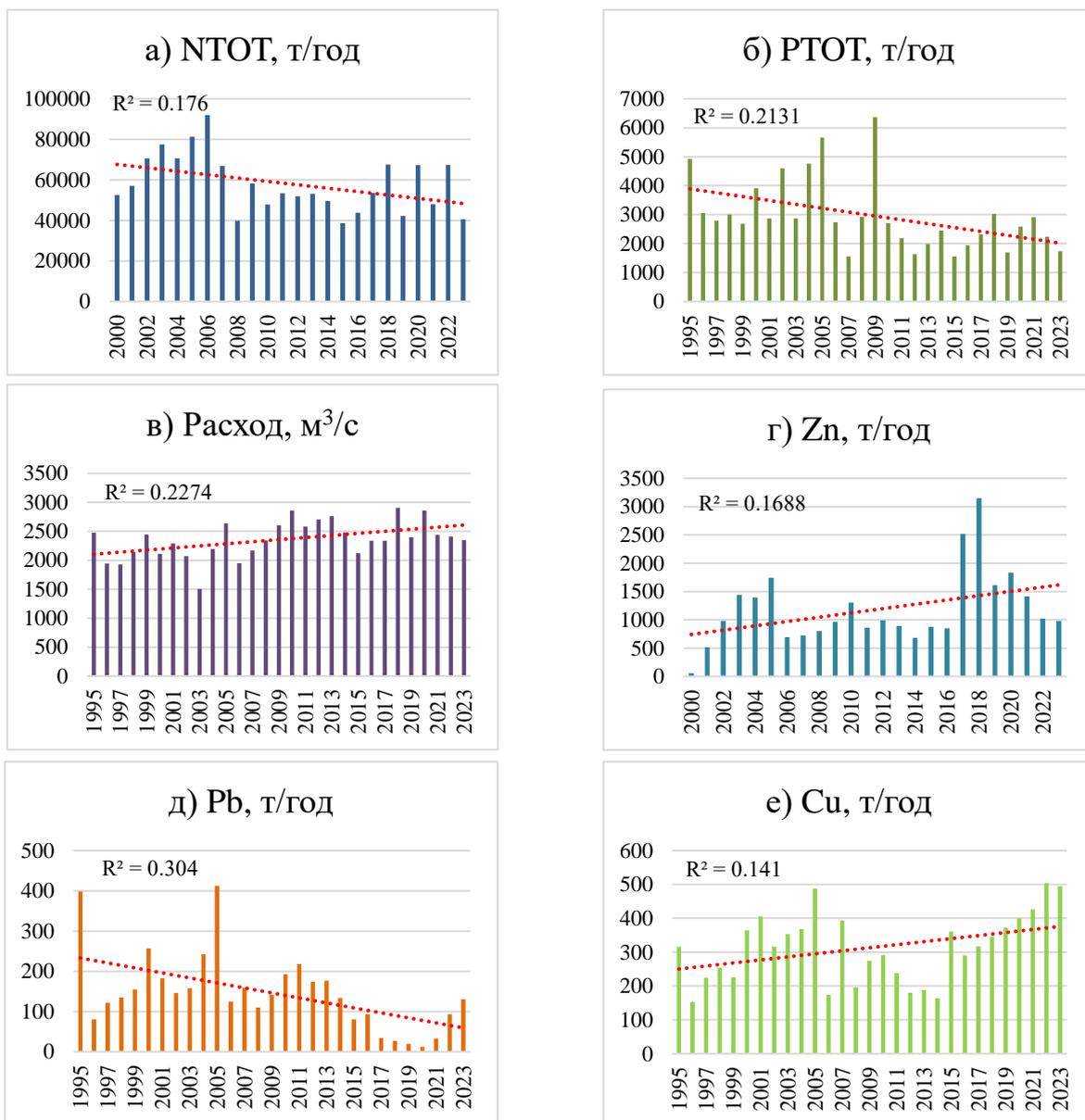


Рисунок 3.4 – Графики значимых трендов, р. Нева.

- а) Общий азот, б) Общий фосфор, в) Расход воды, г) Концентрация цинка, д) Концентрация свинца, е) Концентрация меди.

На реке Луга имеется значимое понижение концентраций тяжелых металлов (Pb, Cu, Cd), которое представлено на рисунке ниже. Графики других показателей представлены в Приложении В.

Таблица 3.3 – Оценка значимости трендов, р. Луга

Элемент	n	R <sup>2</sup>	σ <sub>R</sub>	t <sub>2α</sub>	R	R/σ <sub>R</sub>	R/σ <sub>R</sub> >t <sub>2α</sub>	Повышение/ понижение
БПК <sub>5</sub> , т/год	29	0,0136	0,191	2,05	0,12	0,61	не значим	-
БПК <sub>7</sub> , т/год	18	0,0423	0,245	2,12	0,21	0,84	не значим	-
N-NO <sub>3</sub> , т/год	29	0,0698	0,186	2,05	0,26	1,42	не значим	+
N-NO <sub>2</sub> , т/год	29	0,0032	0,192	2,05	0,06	0,29	не значим	-
P-PO <sub>4</sub> , мг/л	29	0,00003	0,192	2,05	0,01	0,03	не значим	
НТОТ, т/год	23	0,0744	0,210	2,08	0,27	1,30	не значим	-
РТОТ, т/год	23	0,0558	0,212	2,08	0,24	1,11	не значим	-
Расход, м <sup>3</sup> /с	29	0,0095	0,192	2,05	0,10	0,51	не значим	-
Zn, т/год	21	0,1215	0,215	2,09	0,35	1,62	не значим	-
Pb, т/год	29	0,6034	0,121	2,05	0,78	6,41	значим	-
Cu, т/год	29	0,1926	0,173	2,05	0,44	2,54	значим	-
Cd, т/год	29	0,3995	0,149	2,05	0,63	4,24	значим	-
Ni, т/год	21	0,0011	0,229	2,09	0,03	0,14	не значим	-

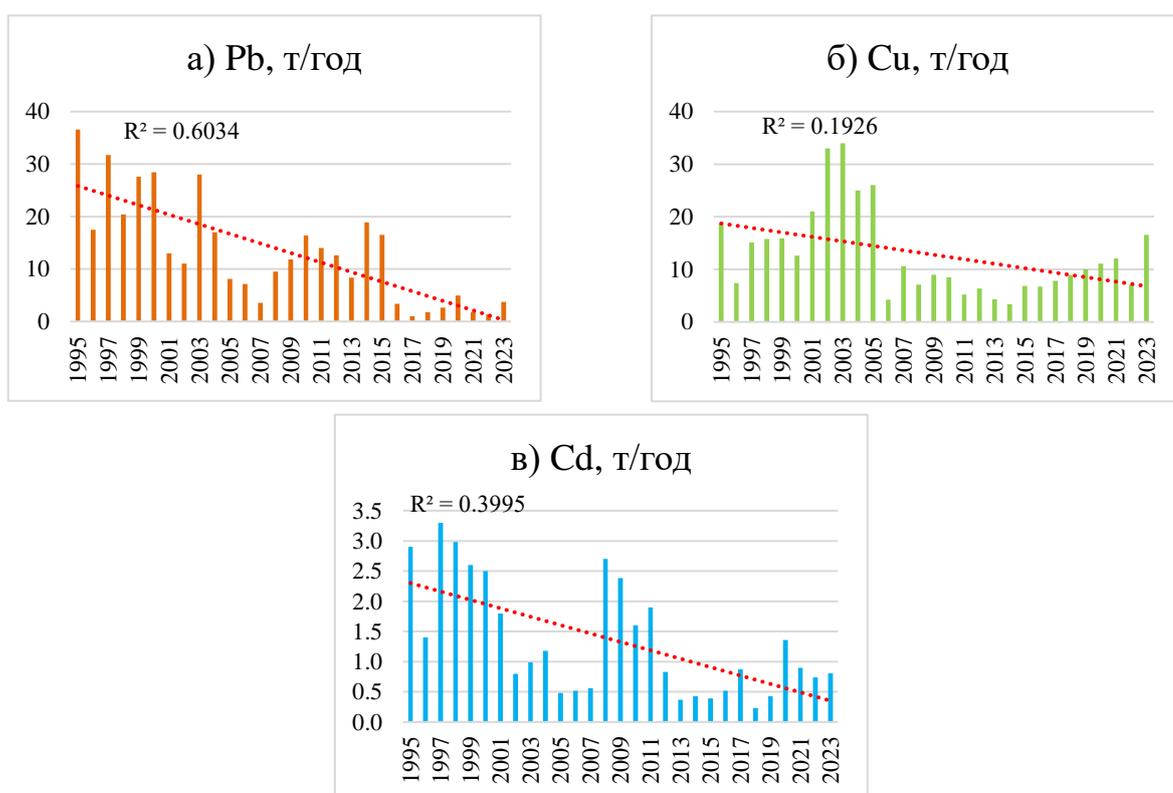


Рисунок 3.5 – Графики значимых трендов, р. Луга.

а) Концентрация свинца, б) Концентрация меди, в) Концентрация кадмия

На реке Нарва статистически значимые тренды наблюдаются по показателям БПК<sub>7</sub>, общего азота и концентрации свинца (Рисунок 3.4). Также следует отметить, что Нарва является территориальной границей Эстонии и России, поэтому требует более тщательного мониторинга. Графики по реке Нарва представлены в Приложении Г.

Таблица 3.4 – Оценка значимости трендов, р. Нарва

Элемент	n	R <sup>2</sup>	$\sigma_R$	$t_{2\alpha}$	R	R/ $\sigma_R$	R/ $\sigma_R > t_{2\alpha}$	Повышение/ понижение
БПК <sub>5</sub> , т/год	25	0,0244	0,206	2,07	0,156	0,76	не значим	-
БПК <sub>7</sub> , т/год	14	0,4293	0,218	2,18	0,655	3,00	значим	-
N-NO <sub>3</sub> , т/год	25	0,0346	0,205	2,07	0,186	0,91	не значим	-
N-NO <sub>2</sub> , т/год	25	0,0847	0,199	2,07	0,291	1,46	не значим	-
P-PO <sub>4</sub> , мг/л	25	0,0404	0,204	2,07	0,201	0,98	не значим	-
НТОТ, т/год	21	0,3062	0,191	2,09	0,553	2,90	значим	-
РТОТ, т/год	18	0,1221	0,234	2,12	0,349	1,49	не значим	+
Расход, м <sup>3</sup> /с	24	0,001	0,213	2,07	0,032	0,15	не значим	
Zn, т/год	24	0,0957	0,203	2,07	0,309	1,53	не значим	-
Pb, т/год	25	0,245	0,181	2,07	0,495	2,73	значим	-
Cu, т/год	25	0,0183	0,207	2,07	0,135	0,65	не значим	-
Cd, т/год	25	0,1545	0,192	2,07	0,393	2,05	не значим	-
Ni, т/год	21	0,1015	0,217	2,09	0,319	1,47	не значим	+

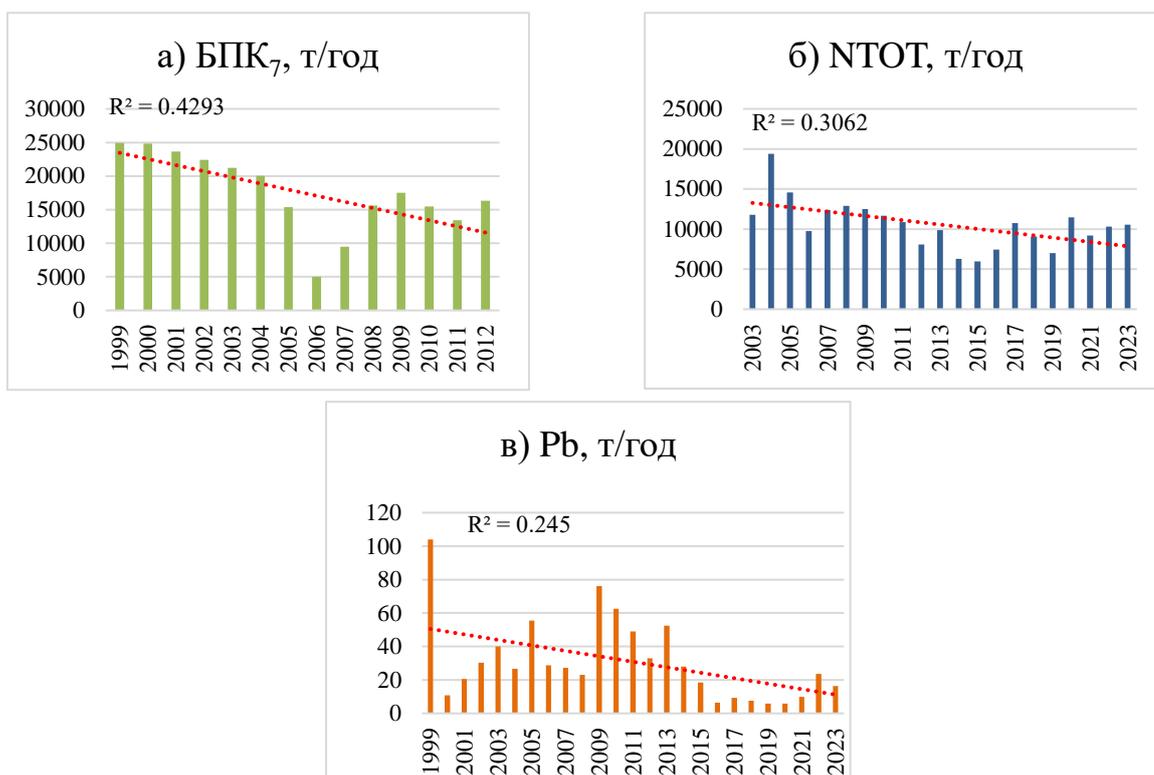


Рисунок 3.6 – Графики значимых трендов, р. Нарва.  
 а) Биологическая потребность в кислороде (БПК<sub>7</sub>), б) Показатель общего азота, в) Концентрация свинца.

### 3.3 Оценка однородности рядов

Была произведена проверка рядов на однородность по всем 4 постам: среднему значению по критерию Стьюдента и дисперсии по критерию Фишера. Проверка проводилась с помощью функции «Пакет анализа» MS Excel.

Ряд по критерию Стьюдента считается однородным, если выполняется условие:

$$t_{\text{крит}} > |t|, \quad (3.4)$$

По Фишеру:

$$F_{\text{крит}} > F. \quad (3.5)$$

Результаты проверок отображены в таблицах 3.5 – 3.8. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

Река Селезневка:

По двум критериям неоднородным является ряд нитратного азота ( $N-NO_3$ ), по Стьюденту неоднородный ряд расходов воды и нитритного азота, а по Фишеру ряды  $P-PO_4$ , концентраций цинка и свинца.

Река Нева:

По двум критериям неоднородный ряд показателя общего фосфора, по Стьюденту ряды БПК<sub>5</sub>, БПК<sub>7</sub>,  $N-NO_2$ , общего азота, расхода воды, свинца и кадмия, по Фишеру ряды  $N-NO_3$ ,  $P-PO_4$ .

Река Луга:

По двум критериям неоднородные ряды общего фосфора, меди и кадмия, по Стьюденту только ряд концентрации свинца.

Река Нарва:

По двум критериям неоднородные ряды  $N-NO_3$  и свинца, по Стьюденту БПК<sub>7</sub>, общий азот и кадмий, по Фишеру  $P-PO_4$ ,  $N-NO_2$  и концентрация цинка.

Наиболее однородные ряды по различным показателям наблюдаются на реках Селезневка и Луга, а наименее – реки Нева и Нарва. Чаще всего неоднородны ряды общего фосфора, нитратного и нитритного азота, а также тяжелых металлов (Zn, Pb, Cu, Cd). Такие результаты могут указывать на чрезмерные промышленные сбросы.

Таблица 3.5 – Проверка рядов на однородность, р. Селезневка

	БПК <sub>5</sub> , т/год	БПК <sub>7</sub> , т/год	N-NO <sub>3</sub> , т/год	N-NO <sub>2</sub> , т/год	P-PO <sub>4</sub> , мг/л	NTOT, т/год	PTOT, т/год	Расход, м <sup>3</sup> /с	Zn, т/год	Pb, т/год	Cu, т/год	Cd, т/год	Ni, т/год
<b>Стьудент</b>	одн	одн	неодн	неодн	одн	одн	одн	неодн	одн	одн	одн	одн	одн
<b>Фишер</b>	одн	одн	неодн	одн	неодн	одн	одн	одн	неодн	неодн	одн	одн	одн

Таблица 3.6 – Проверка рядов на однородность, р. Нева

	БПК <sub>5</sub> , т/год	БПК <sub>7</sub> , т/год	N-NO <sub>3</sub> , т/год	N-NO <sub>2</sub> , т/год	P-PO <sub>4</sub> , мг/л	NTOT, т/год	PTOT, т/год	Расход, м <sup>3</sup> /с	Zn, т/год	Pb, т/год	Cu, т/год	Cd, т/год	Ni, т/год
<b>Стьудент</b>	неодн	неодн	одн	неодн	одн	неодн	неодн	неодн	одн	неодн	одн	неодн	одн
<b>Фишер</b>	одн	одн	неодн	одн	неодн	одн	неодн	одн	одн	одн	одн	одн	одн

Таблица 3.7 – Проверка рядов на однородность, р. Луга

	БПК <sub>5</sub> , т/год	БПК <sub>7</sub> , т/год	N-NO <sub>3</sub> , т/год	N-NO <sub>2</sub> , т/год	P-PO <sub>4</sub> , мг/л	NTOT, т/год	PTOT, т/год	Расход, м <sup>3</sup> /с	Zn, т/год	Pb, т/год	Cu, т/год	Cd, т/год	Ni, т/год
<b>Стьудент</b>	одн	одн	одн	одн	одн	одн	неодн	одн	одн	неодн	неодн	неодн	одн
<b>Фишер</b>	одн	одн	одн	одн	одн	одн	неодн	одн	одн	одн	неодн	неодн	неодн

Таблица 3.8 – Проверка рядов на однородность, р. Нарва

	БПК <sub>5</sub> , т/год	БПК <sub>7</sub> , т/год	N-NO <sub>3</sub> , т/год	N-NO <sub>2</sub> , т/год	P-PO <sub>4</sub> , мг/л	NTOT, т/год	PTOT, т/год	Расход, м <sup>3</sup> /с	Zn, т/год	Pb, т/год	Cu, т/год	Cd, т/год	Ni, т/год
<b>Стьудент</b>	одн	неодн	неодн	одн	одн	неодн	одн	одн	одн	неодн	одн	неодн	одн
<b>Фишер</b>	одн	одн	неодн	неодн	неодн	одн	одн	одн	неодн	неодн	одн	одн	одн

### 3.4 Нормализация

Как уже упоминалось ранее, нормализацию требуется проводить для каждой реки отдельно, чтобы устранить основную часть вариаций, вносимых различными колебаниями стока.

В качестве первого шага определяются натуральные логарифмы исследуемого показателя и расхода воды, после чего строится их зависимость. Далее использовалась функция MS Excel, которая возвращает параметры линейного приближения по методу наименьших квадратов и используется для того, чтобы вычислить прямую линию, которая сможет наилучшим способом аппроксимировать данные. Определяются нормализованные значения по формуле:

$$L_{Ni} = \exp (\ln Q_i - \overline{\ln Q}) \cdot \hat{\beta}) \cdot \exp (0,5 \cdot \text{MSE}), \quad (3.6)$$

где  $\hat{\beta}$  – оценочный параметр, связанный с линейной регрессией;

MSE – среднее квадратическое отклонение.

Графики нормализованных значений по азотным и фосфорным показателям представлены на рисунках ниже, дополнительные графики отображены в Приложении Д.

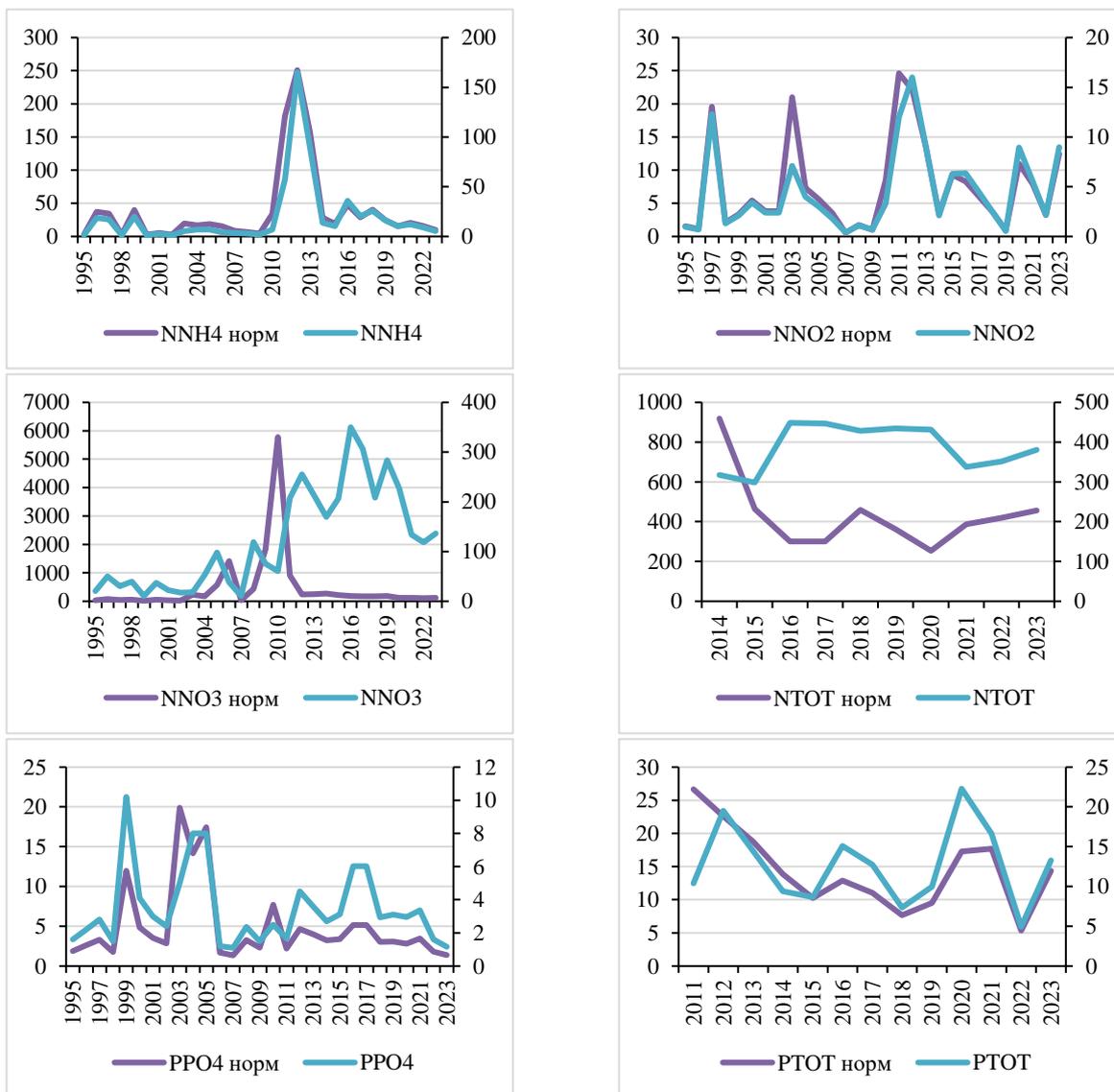


Рисунок 3.7 – Графики хода биогенных показателей, т/год, р. Селезневка. (голубой – исходные значения, фиолетовый – нормализованные значения).

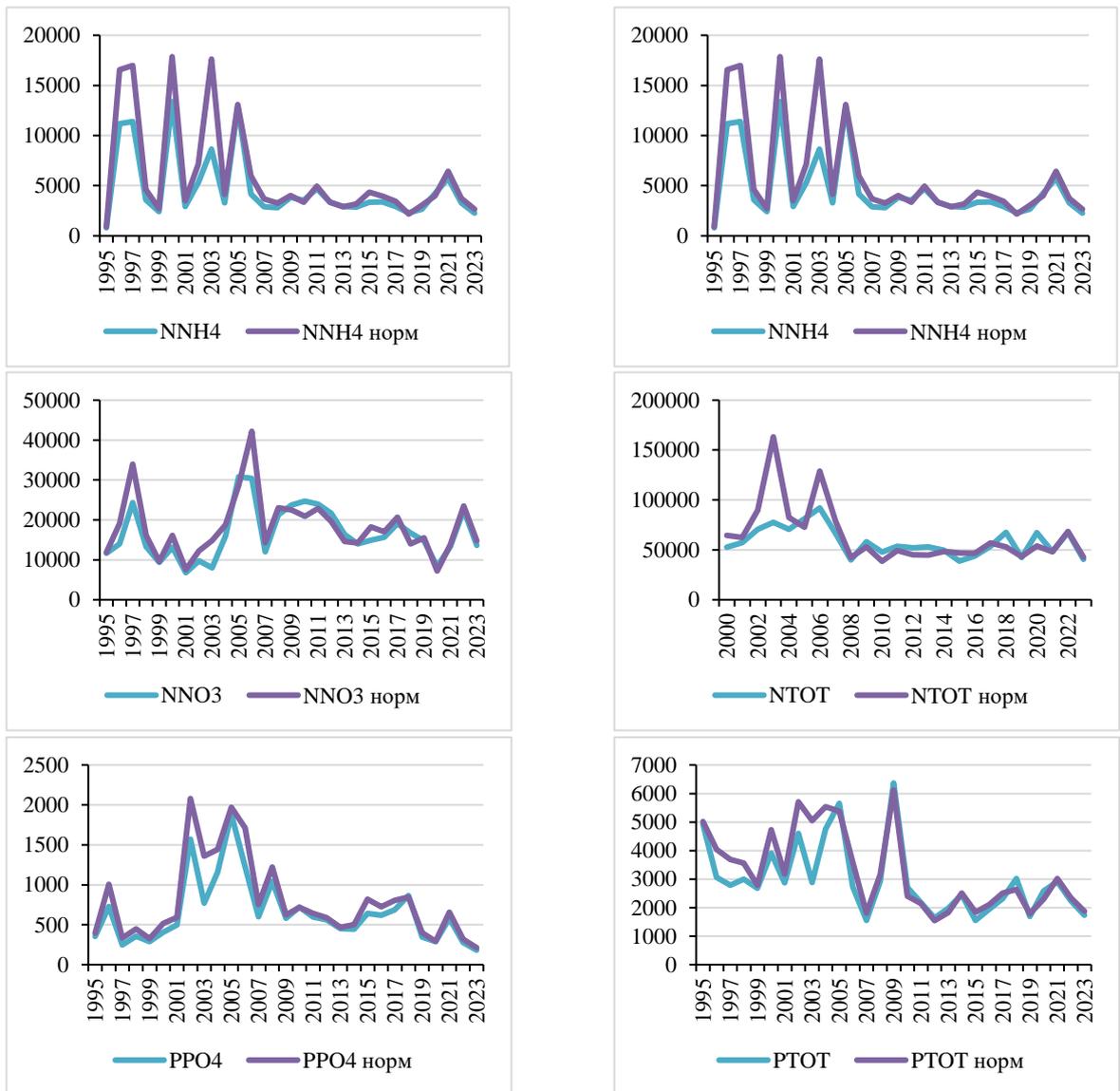


Рисунок 3.8 – Графики хода биогенных показателей, т/год, р. Нева. (голубой – исходные значения, фиолетовый – нормализованные значения).

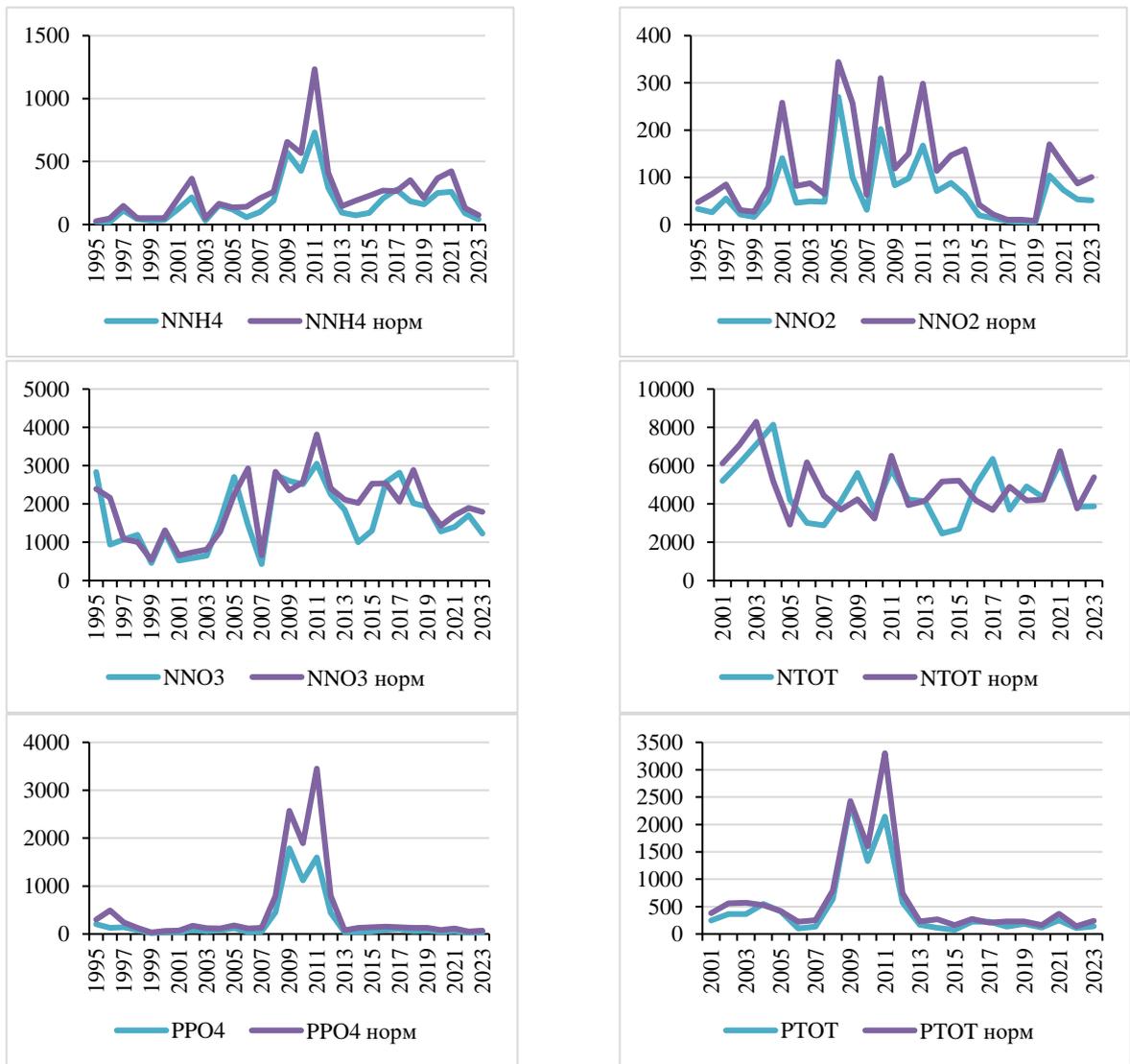


Рисунок 3.9 – Графики хода биогенных показателей, т/год, р. Луга.  
(голубой – исходные значения, фиолетовый – нормализованные значения).

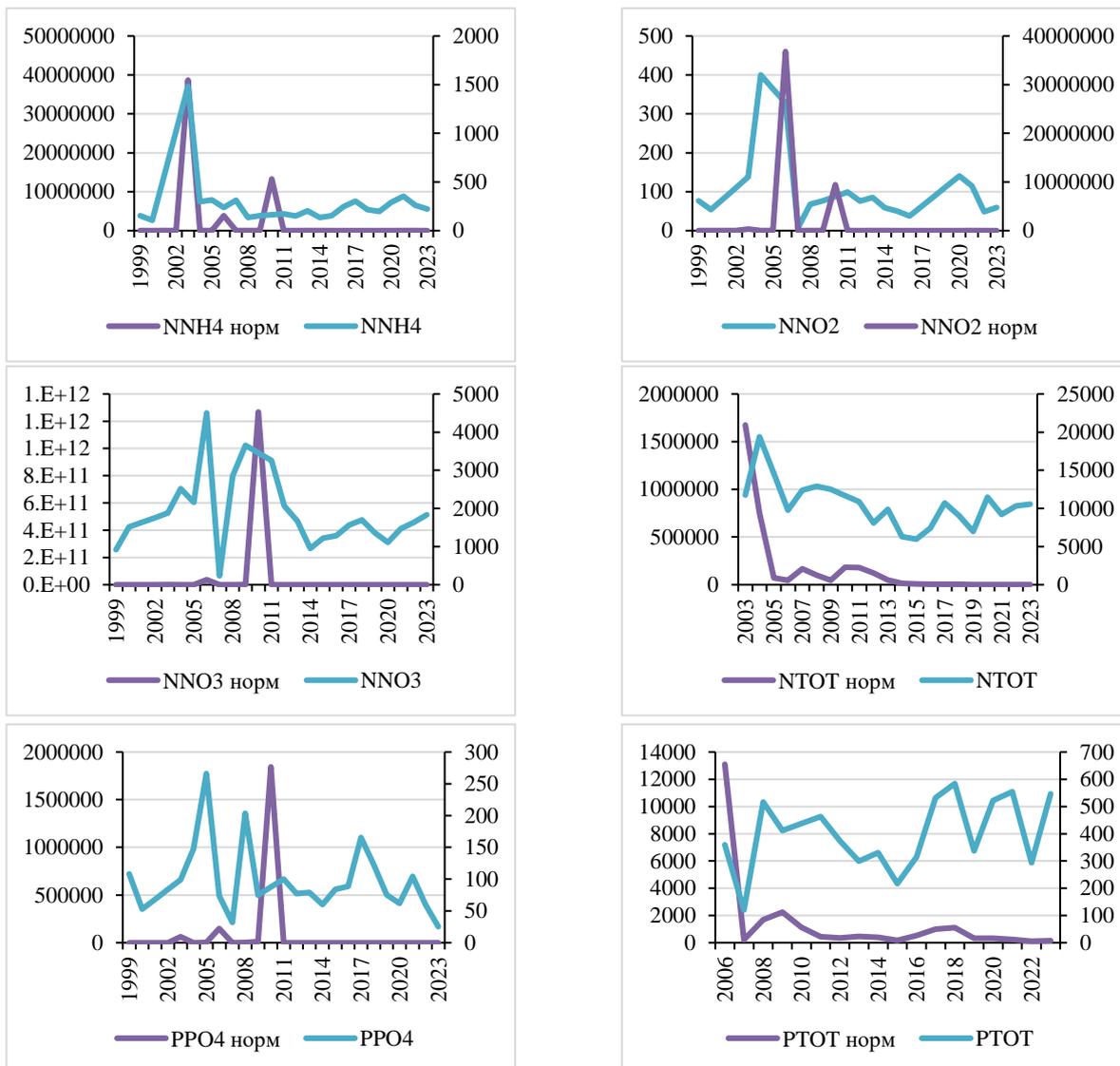


Рисунок 3.10 – Графики хода биогенных показателей, т/год, р. Нарва. (голубой – исходные значения, фиолетовый – нормализованные значения).

### 3.5 Метод Манна-Кендалла

Метод сравнивает пары значений в данных, считает сколько раз последующие значения больше (тренд на повышение) или меньше (тренд на понижение) предыдущих, после чего проверяет случайность изменений или наличие тренда. Плюсами данного метода является устойчивость к выбросам и работа с нелинейными трендами.

Для оценки трендов использовалась разработка Финского метеорологического университета «MAKESSENS» в MS Excel с поддержкой макросов, что значительно упрощает и ускоряет процесс расчетов. Данная процедура оценивается по показателям азота (аммонийный, нитратный, нитритный, общий) и фосфора (фосфатный, общий).

Критерием нулевой гипотезы принимается, что тренд в исходном ряде отсутствует. Все исследуемые ряды имеют длину от 10 до 29 лет, в таком случае применяется тест нормального приближения, а наличие тренда оценивается по Z-тесту. Если знак этого теста положительный, то тренд идет на повышение, а нулевая гипотеза опровергается при выполнении условия  $Z > Z_{1-\alpha/2}$ .

Помимо этого, определяется оценка наклона по Сену, который помогает определить устойчивый тренд, насколько быстро и в каком направлении изменяются значения (возрастание/убывание). Для этого сравниваются все возможные пары точек и определяется их наклон, после чего вычисляется медианный наклон.

Сводная таблица с результатами проверки представлена ниже.

Таблица 3.9 – Результаты проверки рядов по методу Манна-Кендалла по 4 рекам (р. Селезневка, р. Нева, р. Луга, р. Нарва).

\* – слабо значимый тренд, \*\* – значимый тренд, \*\*\* – сильно значимый тренд, + – возможная значимость.

Временной ряд	Начало	Конец	Тренд Манна-Кендалла				Оценка наклона по Сену									
			n	S-тест	Z-тест	Значимость	Q	Q <sub>min99</sub>	Q <sub>max99</sub>	Q <sub>min95</sub>	Q <sub>max95</sub>	B	B <sub>min99</sub>	B <sub>max99</sub>	B <sub>min95</sub>	B <sub>max95</sub>
<b>река Селезневка</b>																
NNH <sub>4</sub> , т/год	1995	2023	29		1.971216	*	0.354073	-0.23929	0.878795	0	0.711644	2.814109	15.21579	-2.67277	9.1	-0.83493
NNO <sub>2</sub> , т/год	1995	2023	29		1.500909		0.112917	-0.08326	0.303555	-0.02165	0.275705	1.7225	4.377983	0.275116	3.216469	0.472885
NNO <sub>3</sub> , т/год	1995	2023	29		4.070499	***	8.172767	3.623467	12.98206	4.324796	11.66133	13.95447	34.98291	-53.0913	21.65041	-36.1453
NTOT, т/год	2014	2023	10		-0.17889		-2.57	-19.3008	27.56403	-17.5473	20.34773	470.0991	871.596	-240.094	828.2566	-73.0451
PO <sub>4</sub> , т/год	1995	2023	29		0.187614		0.005875	-0.12909	0.095568	-0.0816	0.070354	2.794966	5.09547	1.213296	4.250357	1.6
PTOT, т/год	2011	2023	13		-0.30504		-0.2877	-1.56937	1.203754	-1.35458	0.936278	19.05927	47.25611	-13.7527	42.46989	-7.86822
<b>река Нева</b>																
NNH <sub>4</sub> , т/год	1995	2023	29		-1.63195		-57.861	-225.964	31.03934	-167.717	6.442587	4408.916	7488.694	2812.331	6481.218	3243.436
NNO <sub>2</sub> , т/год	1995	2023	29		-1.36934		-14.2768	-47.4433	13.55	-39.2154	9.855796	920.2144	1336.144	537.25	1220.954	581.3073
NNO <sub>3</sub> , т/год	1995	2023	29		0.5815		67.36864	-461.701	447.432	-272.77	351.5916	13912.63	25216.4	9222.835	21271.79	11331.32
NTOT, т/год	2000	2023	24		-1.86033	+	-746.409	-1952.52	226.031	-1718.15	31.09011	66980	88228.81	50571.17	83725.91	52926.58
PO <sub>4</sub> , т/год	1995	2023	29		-0.91915		-5.905	-31.6532	13.33664	-26.4469	9.744659	669.86	1100.105	376.0572	982.5752	436.932
PTOT, т/год	1995	2023	29		-2.75744	**	-48.221	-112.573	-4.90628	-93.8185	-18.9553	3266.431	4395.004	2789.969	4116.178	2979.732
<b>река Луга</b>																
NNH <sub>4</sub> , т/год	1995	2023	29		2.194693	*	4.98	-0.88696	11.23193	1.000628	9.669785	69.8	127.3217	-12.4277	109.5937	9.185579
NNO <sub>2</sub> , т/год	1995	2023	29		-0.31889		-0.46938	-2.868	2.726635	-2.39461	1.855772	56.23877	76.85994	24.64721	69.45152	33.0096
NNO <sub>3</sub> , т/год	1995	2023	29		1.219274		29.96402	-41.7318	78.72633	-16.9631	57.30549	1108.18	2396.053	583.2104	1719.368	821.2448
NTOT, т/год	2001	2023	23		-0.89796		-40.5503	-179.324	91.07037	-159.48	52.99073	5008.772	7823.125	2724.921	7366.722	3464.12
PO <sub>4</sub> , т/год	1995	2023	29		-1.18176		-1.39935	-5.6273	1.919959	-4.25261	0.98836	90.89411	177.973	42.64033	148.5052	50.09312
PTOT, т/год	2001	2023	23		-1.58463		-10.9362	-36.852	5.775839	-26.6168	1.074184	446.7877	998.022	101.2182	783.3693	201.5721
<b>река Нарва</b>																
NNH <sub>4</sub> , т/год	1999	2023	25		-0.04672		-0.13812	-16.2674	7.887186	-10.1273	5.885492	225.965	432.3615	98.11281	377.7639	124.0137
NNO <sub>2</sub> , т/год	1999	2023	25		-0.81742		-1.09977	-5.92488	2.495972	-4.28311	1.828136	90.29695	161.6995	51.50403	140.4135	59.74189
NNO <sub>3</sub> , т/год	1999	2023	25		-0.63058		-13.8858	-88.8791	79.24399	-61.9825	39.19593	1861.15	2978.161	921	2598.78	1118.005
NTOT, т/год	2003	2023	21		-2.50634	*	-228.79	-582.37	27.25842	-497.604	-59.8878	14200.19	18089.57	9901.438	17157.14	11682.15
PO <sub>4</sub> , т/год	1999	2023	25		-0.63058		-0.83464	-3.98298	2.038522	-2.87905	1.343071	92.05286	134.6231	59.64252	119.1695	65.64719
PTOT, т/год	2006	2023	18		1.060576		8.04	-13.0784	26.24042	-7.54955	19.7306	316.81	587.9084	-25.9841	487.3433	112.5148

Река Селезневка:

Наблюдается слабо выраженный значимый тренд по аммонийному азоту и сильно значимый тренд с четким увеличением нитратного азота (Рисунок 3.9). Остальные показатели ( $\text{NNO}_2$ ,  $\text{NTOT}$ ,  $\text{PPO}_4$ ,  $\text{PTOT}$ ) не имеют значимого тренда, графики отображены в Приложении Е.

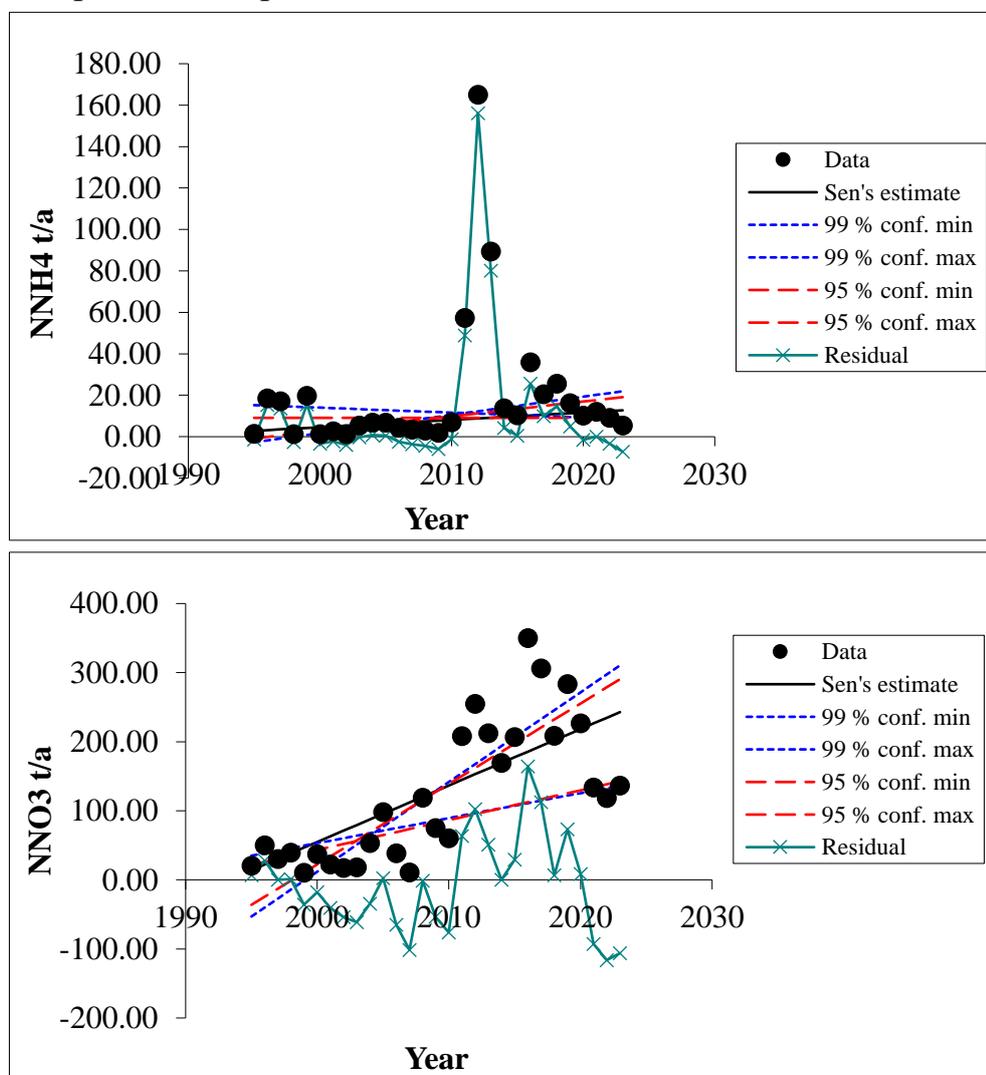


Рисунок 3.11 – Графики значимых трендов по методу Манна-Кендалла, р. Селезневка

Река Нева:

Прослеживается значимый тренд на уменьшение по общему фосфору (Рисунок 3.10) и возможную значимость по ряду наблюдений общего азота, однако это требует дополнительной проверки. Графики незначимых трендов изображены в Приложении Ж.

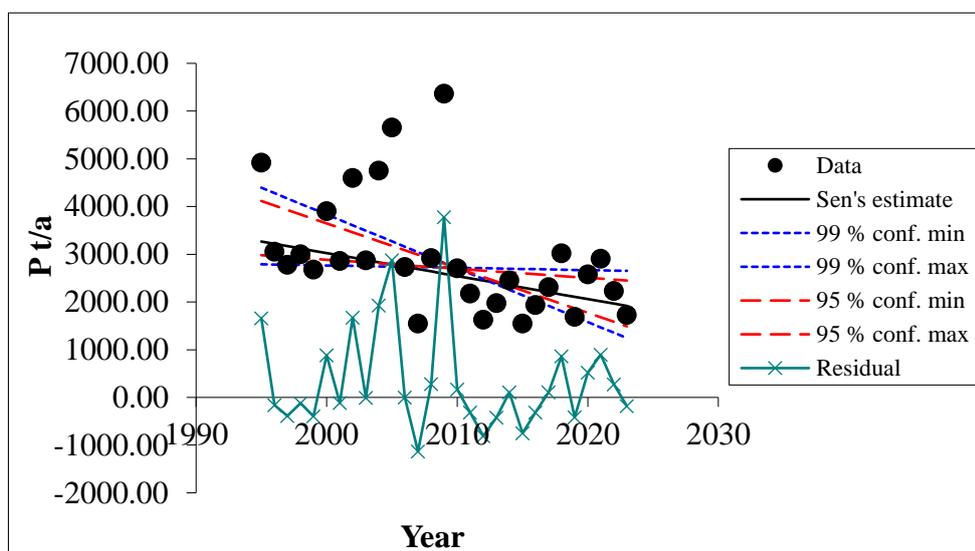


Рисунок 3.12 – График значимого тренда по методу Манна-Кендалла, р. Нева  
Река Луга:

Слабо значимый тренд на повышение по показателю аммонийного азота, другие же показатели имеют незначимую тенденцию. График по  $\text{NNH}_4$  показан на рисунке ниже, по другим веществам в Приложении 3.

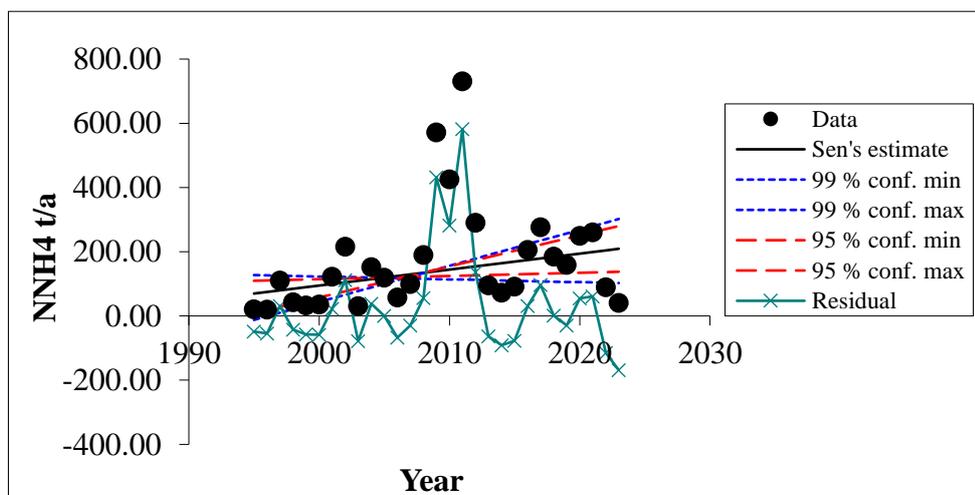


Рисунок 3.13 – График значимого тренда по методу Манна-Кендалла, р. Луга  
Река Нарва:

На Нарве тоже отмечается только один слабо значимый ряд, но на понижение по концентрации общего азота (Рисунок 3.12), графики по остальным показателям приведены в Приложении И.

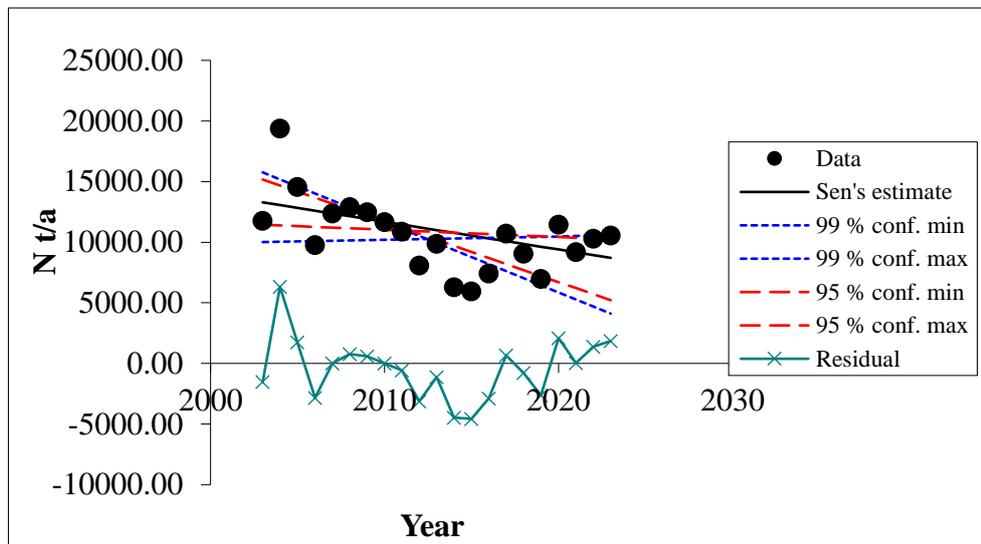


Рисунок 3.14 – График значимого тренда по методу Манна-Кендалла, р. Нарва

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ изменчивости биогенной нагрузки на реках бассейна Балтийского моря (Селезневка, Нева, Луга, Нарва) с использованием различных статистических методов позволил получить комплексную картину динамики загрязнения.

В третьей главе были применены классические методы оценки значимости трендов и однородности рядов, основанные на критериях Стьюдента и Фишера. Эти подходы хорошо проявили себя в выявлении явных изменений, таких как снижение концентраций общего фосфора и свинца на реке Нева или рост нитратного азота и меди на реке Селезневка, обусловленный местными промышленными сбросами. Однако классические методы оказались менее чувствительными к слабым и нелинейным трендам, а также не учитывали влияние гидрологических факторов, что в некоторых случаях могло приводить к искаженным выводам.

Более глубокое понимание процессов удалось достичь благодаря методам, утвержденных HELCOM – нормализации данных и анализу по методу Манна-Кендалла. Нормализация, устраняющая влияние колебаний стока, позволила выявить устойчивые тенденции, которые ранее могли маскироваться гидрологической изменчивостью. Например, на реке Нева она подтвердила долгосрочное снижение общей фосфорной нагрузки, а на реке Селезневка – устойчивый рост нитратов.

Метод Манна-Кендалла, в свою очередь, оказался особенно ценным для обнаружения слабых, но статистически значимых трендов, таких как увеличение аммонийного азота на реке Луга, которое не проводился при первоначальном анализе. Этот метод также продемонстрировал свою эффективность при работе с неоднородными данными, где классические подходы давали менее надежные результаты.

Сравнивая эффективность разных методов, можно отметить, что привычные статистические подходы хороши для первоначальной оценки ситуации, тогда как нормализация и метод Манна-Кендалла обеспечивают более тщательный и точный анализ, особенно важный для рек с высокой изменчивостью стока или слабо выраженными тенденциями загрязнения. Комбинация этих методов позволила только подтвердить ранее обнаруженные закономерности.

Наиболее значимые изменения были зафиксированы по следующим показателям: снижение фосфорной нагрузки на Неве, рост нитратов на Селезневке, уменьшение концентраций тяжелых металлов на Луге и сложная динамика азотных соединений на Нарве. Эти результаты указывают как на успехи природоохранных мер, так и на сохраняющиеся проблемы (рост нитратного загрязнения). Особого внимания требуют трансграничные водотоки, такие как Нарва, где учет всех факторов загрязнения осложняется их международным характером.

Итоговый вывод исследования: для достоверной оценки биогенной нагрузки необходимо комплексное применение различных методов статистического анализа. Классические подходы обеспечивают первоначальную оценку, тогда как нормализация и методы непараметрической статистики позволяют углубить понимание долгосрочных тенденций. Полученные результаты подчеркивают важность продолжения мониторинга с акцентом на слабоизученные показатели и проблемные участки, а также необходимость разработки адресных мер регулирования для конкретных загрязняющих веществ и речных систем. Дальнейшие исследования могли бы дополнить статистический анализ моделированием для прогнозирования изменений при различных сценариях антропогенной нагрузки и климатических изменений.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Finnish Meteorological Institute – URL: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/>. (Дата обращения: 02.06.2025).
2. For People and Planet The United Nations Environment Programme strategy for tackling climate change, biodiversity and nature loss, and pollution and waste from 2022—2025. – URL: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/42683/medium\\_term\\_strategy\\_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/42683/medium_term_strategy_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y). (Дата обращения: 29.05.2025).
3. HELCOM (2022) HELCOM Guidelines for the annual and periodical compilation and reporting of waterborne pollution inputs to the Baltic Sea (PLC-Water). Helsinki, Finland, HELCOM, 173pp. DOI: <https://doi.org/10.25607/OBP-1927>. (Дата обращения: 20.01.2025).
4. Larsen, S.E, & Svendsen, L.M. 2021. Statistical aspects in relation to Baltic Sea Pollution Load Compilation. Task under HELCOM PLC-8 project. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 60 pp. Technical Report No. 224. <http://dce2.au.dk/pub/TR224.pdf>. (Дата обращения: 14.03.2025).
5. Sampo Pihlainen, Marianne Zandersen, Kari Huutiäinen, Hans Estrup Andersen, Alena Bartosova, Bo Gustafsson, Mohamed Jabloun, Michelle McCrackin, H.E. Markus Meier, Jørgen E. Olesen, Sofia Saraiva, Dennis Swaney, Hans Thodsen. Impacts of changing society and climate on nutrient loading to the Baltic Sea. Science of The Total Environment. Volume 731, 2020, 138935. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138935>. (Дата обращения: 26.03.2025).
6. Schernewski Gerald & Neumann Thomas. (2002). Impact of river basin management on the Baltic Sea: Ecological and economical implications of different nutrient load reduction strategies. [https://www.researchgate.net/publication/260309564\\_Impact\\_of\\_river\\_basin\\_manage](https://www.researchgate.net/publication/260309564_Impact_of_river_basin_manage)

- ment on the Baltic Sea Ecological and economical implications of different nutrient load reduction strategies. (Дата обращения: 10.05.2025).
7. Stakėnienė, R.; Jokšas, K.; Kriaučiūnienė, J.; Jakimavičius, D.; Raudonytė-Svirbutavičienė, E. Nutrient Loadings and Exchange between the Curonian Lagoon and the Baltic Sea: Changes over the Past Two Decades (2001–2020). *Water* 2023, 15, 4096. <https://doi.org/10.3390/w15234096>. (Дата обращения: 10.05.2025).
  8. The PLC waterborne database (HELCOM PLC-Water). – URL: [https://nest.su.se/helcom\\_plc/](https://nest.su.se/helcom_plc/). (Дата обращения: 28.01.2025).
  9. The United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace; executive summary. – URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388950>. (Дата обращения: 29.05.2025).
  10. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). – URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php>. (Дата обращения: 20.01.2025).
  11. Воды и веси (эколого-исторический очерк). Л. Л. Ильина, В. З. Родионов. СПб. 1997. 152 с.
  12. Все реки. Информационный сайт о реках России. – URL: <https://vsereki.ru/atlanticheskij-ocean/bassejn-baltijskogo-morya/seleznyovka>. (Дата обращения: 28.02.2025).
  13. Пиломатериалы в Выборге от производителя — Vorenius. – URL: <https://woodborenius.ru/#production>. (Дата обращения: 05.05.2025).
  14. Ресурсы поверхностных вод СССР: Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Ч. 1. Т. 2 / Под ред. канд. техн. наук В. Е. Водогрецкого; Сев.-Зап. упр. гидрометеорол. службы. Гос. гидрол. ин-т. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1972. 528 с.
  15. Ресурсы поверхностных вод СССР: Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Ч. 3. Гидрографические описания рек и озер. Т. 2 / Под ред. канд. техн.

наук В. Е. Водогрецкого; Сев.-Зап. упр. гидрометеорол. службы. Гос. гидрол. ин-т. Ленинград: Гидрометеиздат, 1972. 552 с.

16. Сикан А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебник. Специальность «Гидрология» направления подготовки «Гидрометеорология». – СПб.: изд. РГГМУ. 2007. – 279 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ

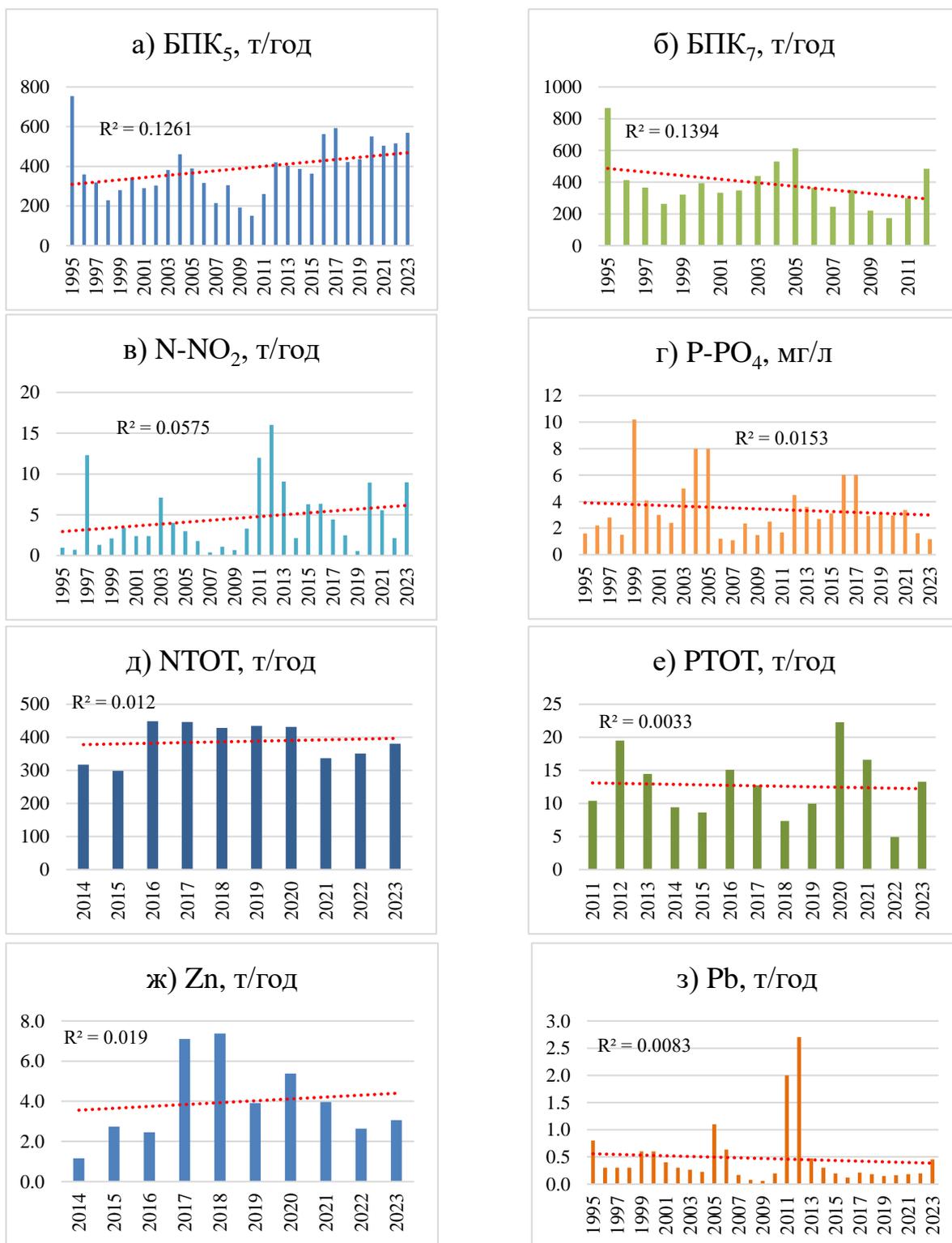


Рисунок А.1 – Графики трендов биогенных показателей, р. Селезневка.  
 а) Биологическая потребность в кислороде (БПК<sub>5</sub>), б) Биологическая потребность в кислороде (БПК<sub>7</sub>), в) Нитритный азот, г) Фосфатный фосфор, д) Общий показатель азота, е) Общий показатель фосфора, ж) Концентрация цинка, з) Концентрация свинца

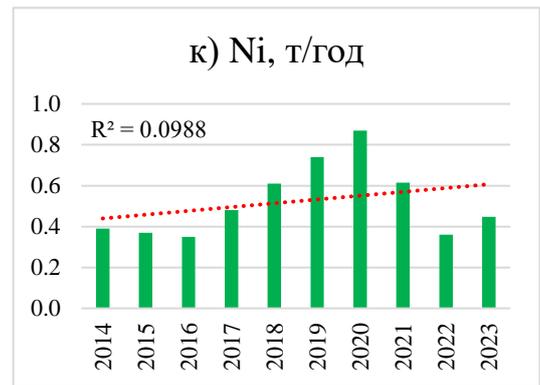
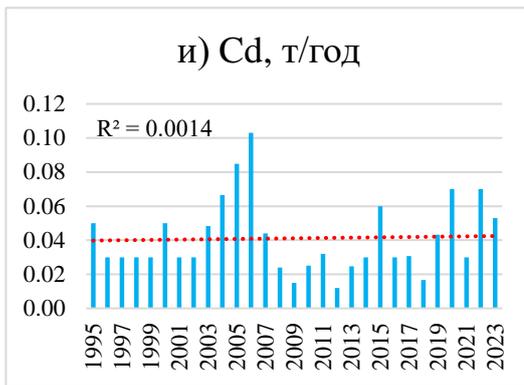


Рисунок А.2 – Графики трендов биогенных показателей, р. Селезневка.  
и) Концентрация кадмия, к) Концентрация никеля.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ

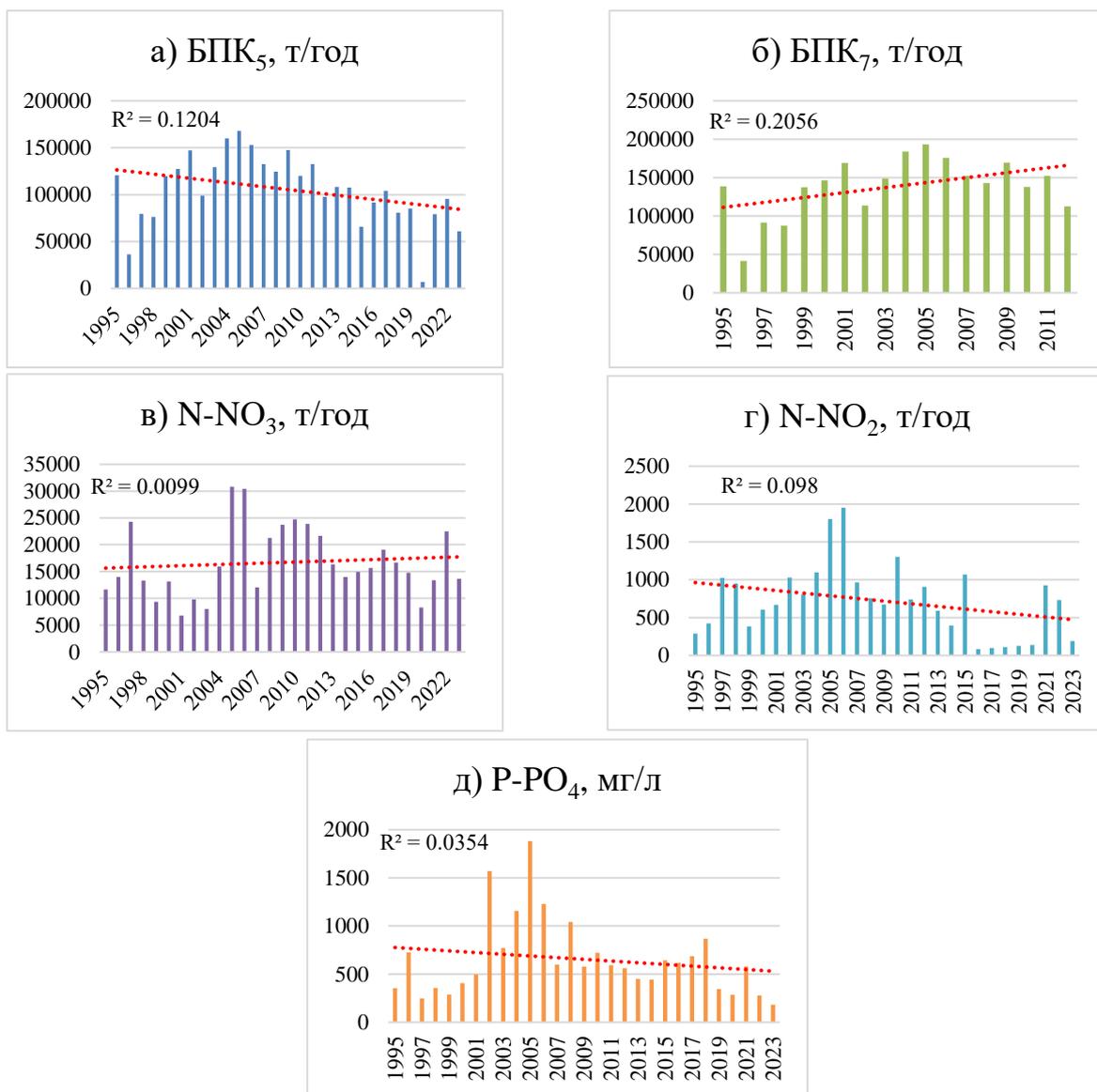


Рисунок Б.1 – Графики трендов биогенных показателей, р. Нева.

а) Биологическая потребность в кислороде (БПК<sub>5</sub>), б) Биологическая потребность в кислороде (БПК<sub>7</sub>), в) Нитратный азот, г) Нитритный азот, д) Фосфатный фосфор.

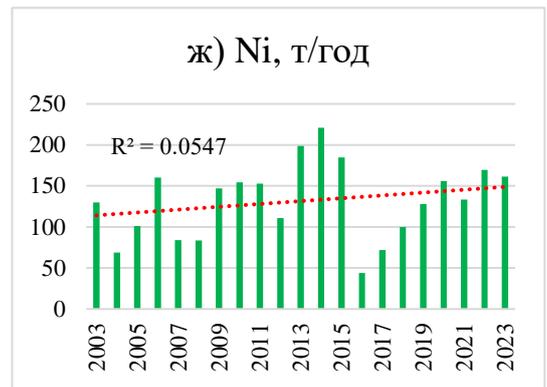
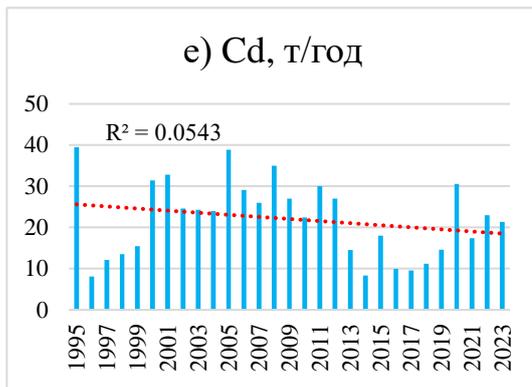


Рисунок Б.2 – Графики трендов биогенных показателей, р. Нева.  
 е) Концентрация кадмия, ж) Концентрация никеля.

ПРИЛОЖЕНИЕ В – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ

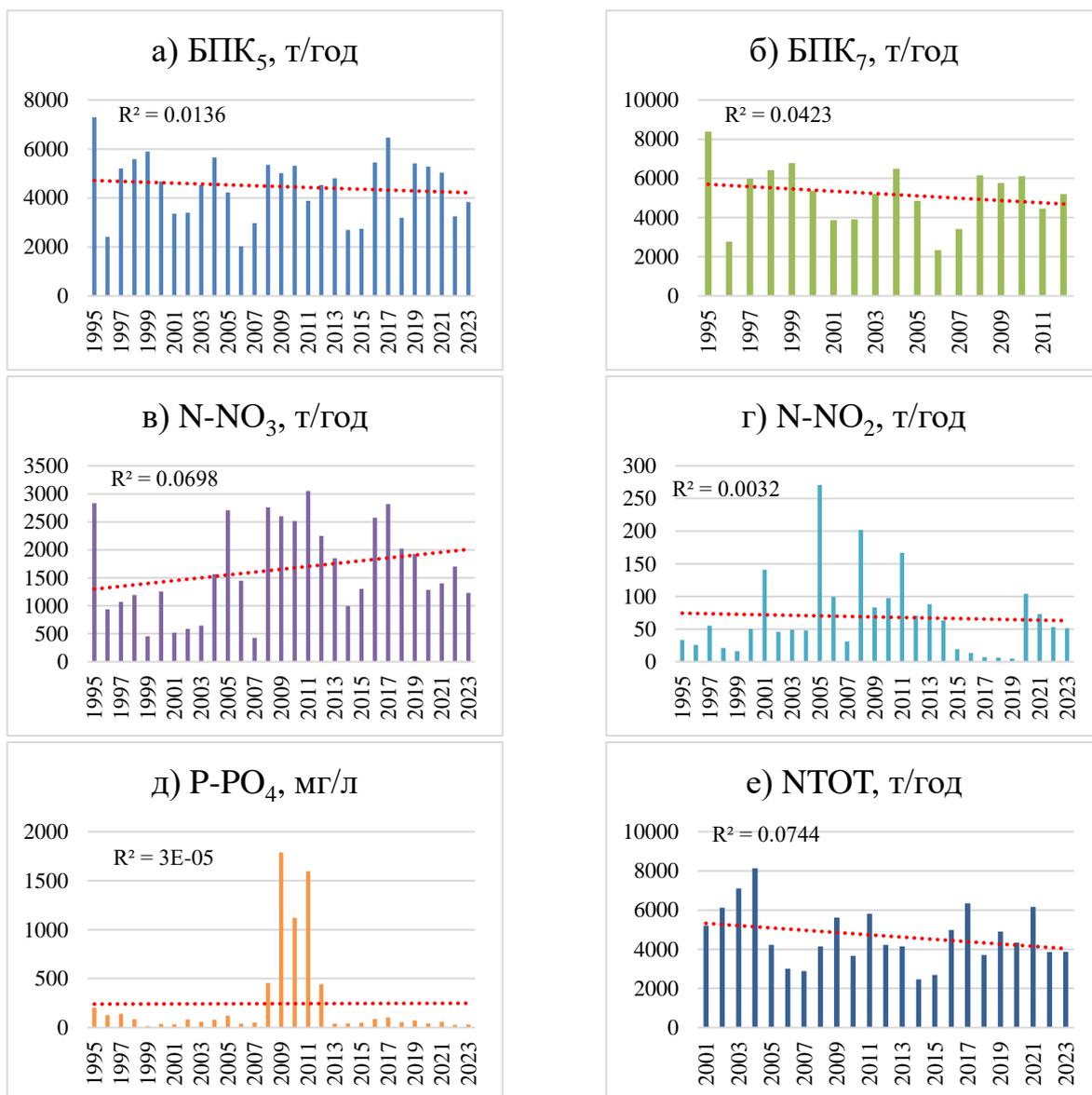


Рисунок В.1 – Графики трендов биогенных показателей, р. Луга.

а) Биологическая потребность в кислороде (БПК<sub>5</sub>), б) Биологическая потребность в кислороде (БПК<sub>7</sub>), в) Нитратный азот, г) Нитритный азот, д) Фосфатный фосфор, е) Общий показатель азота.

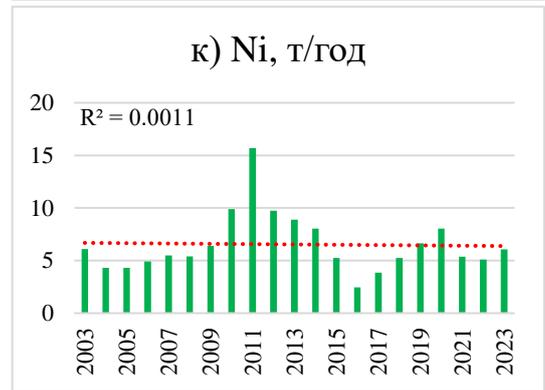
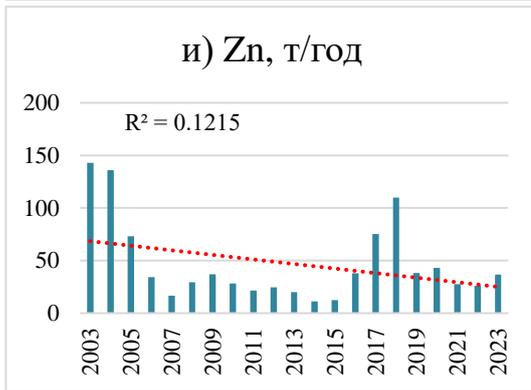
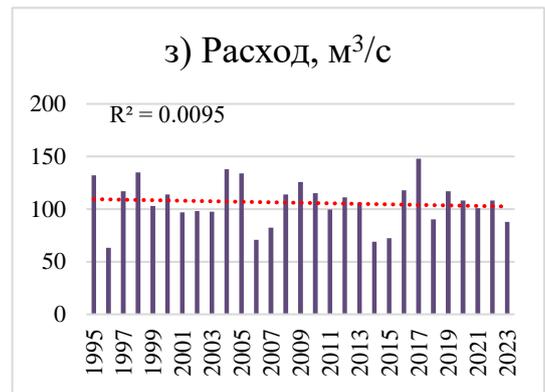
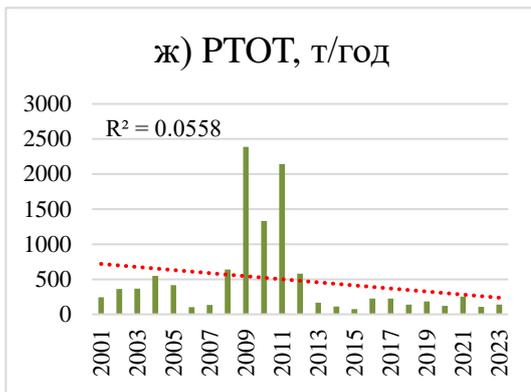


Рисунок В.2 – Графики трендов биогенных показателей, р. Луга.

ж) Общий показатель фосфора, з) Расход воды, и) Концентрация цинка, к) Концентрация никеля.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ

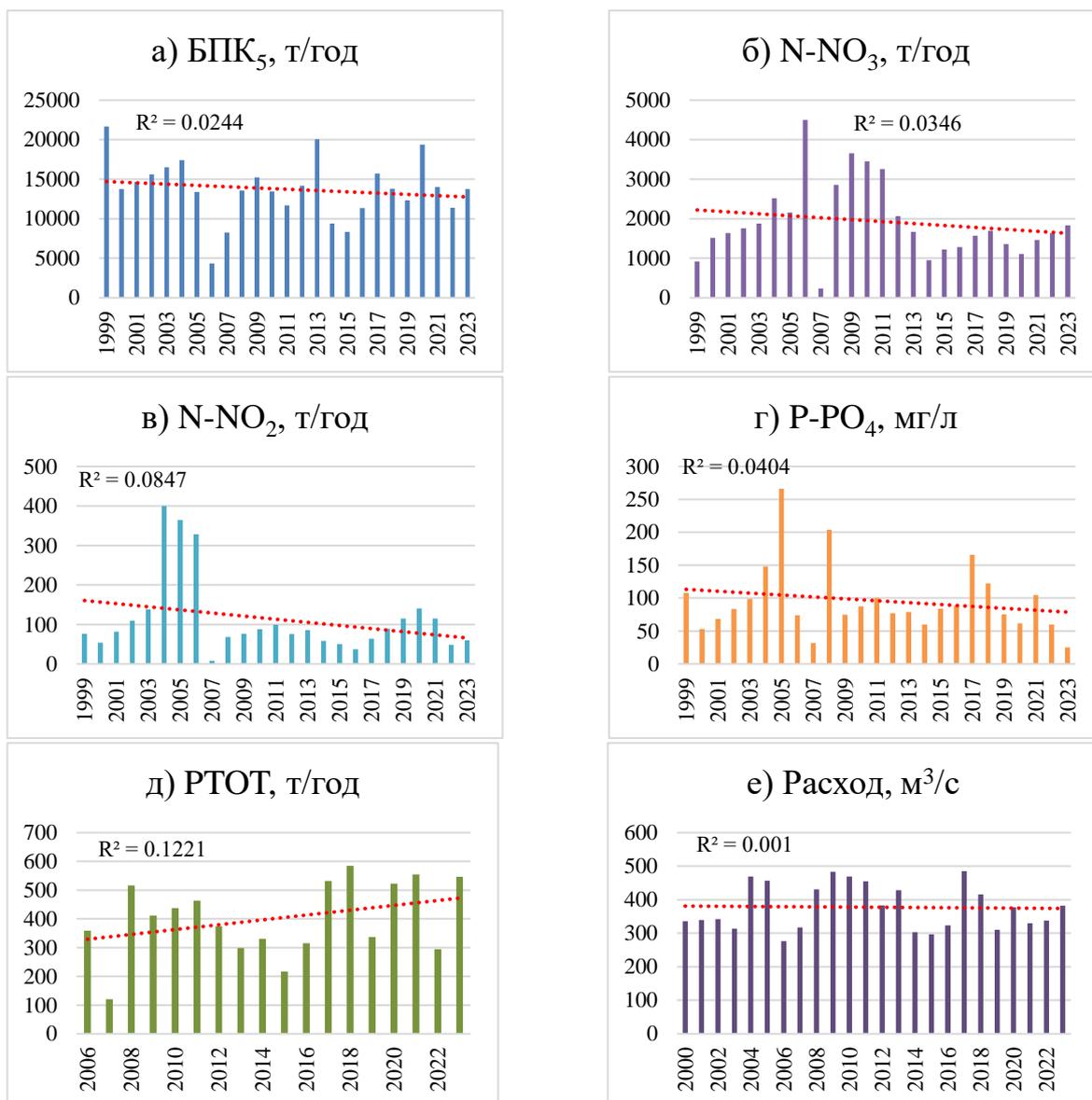


Рисунок Г.1 – Графики трендов биогенных показателей, р. Нарва.

а) Биологическая потребность в кислороде (БПК<sub>5</sub>), б) Нитратный азот, в) Нитритный азот, г) Фосфатный фосфор, д) Общий показатель фосфора, е) Расход ВОДЫ.

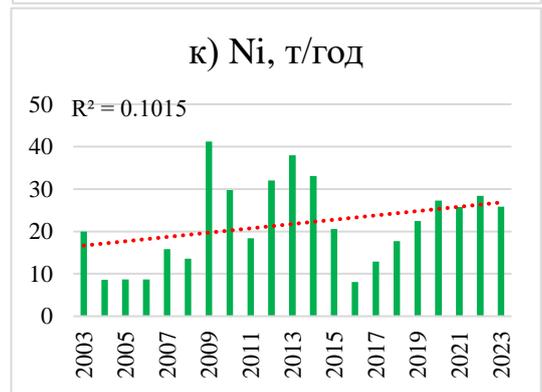
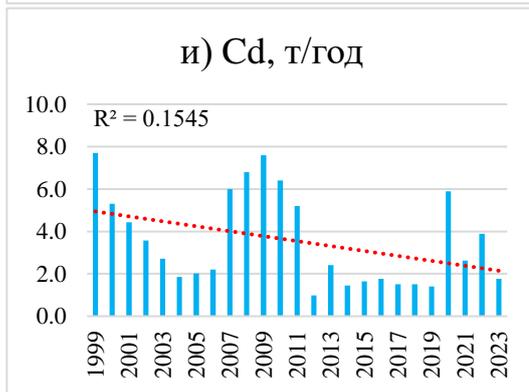
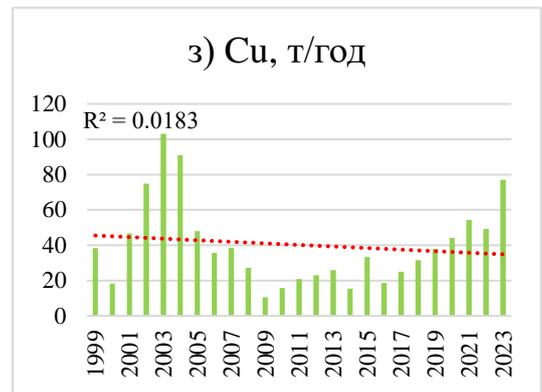
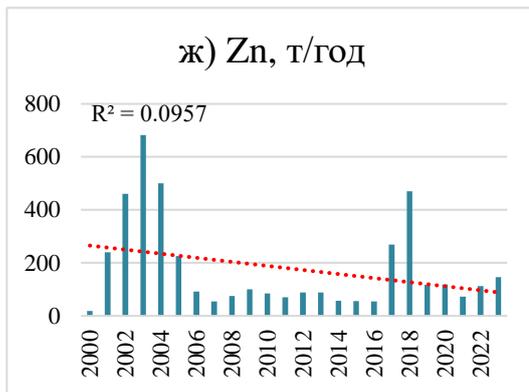


Рисунок Г.2 – Графики трендов биогенных показателей, р. Нарва.  
 ж) Концентрация цинка, з) Концентрация меди, и) Концентрация кадмия, к)  
 Концентрация никеля.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Графики логарифмических зависимостей, хронологического хода концентраций и расхода воды

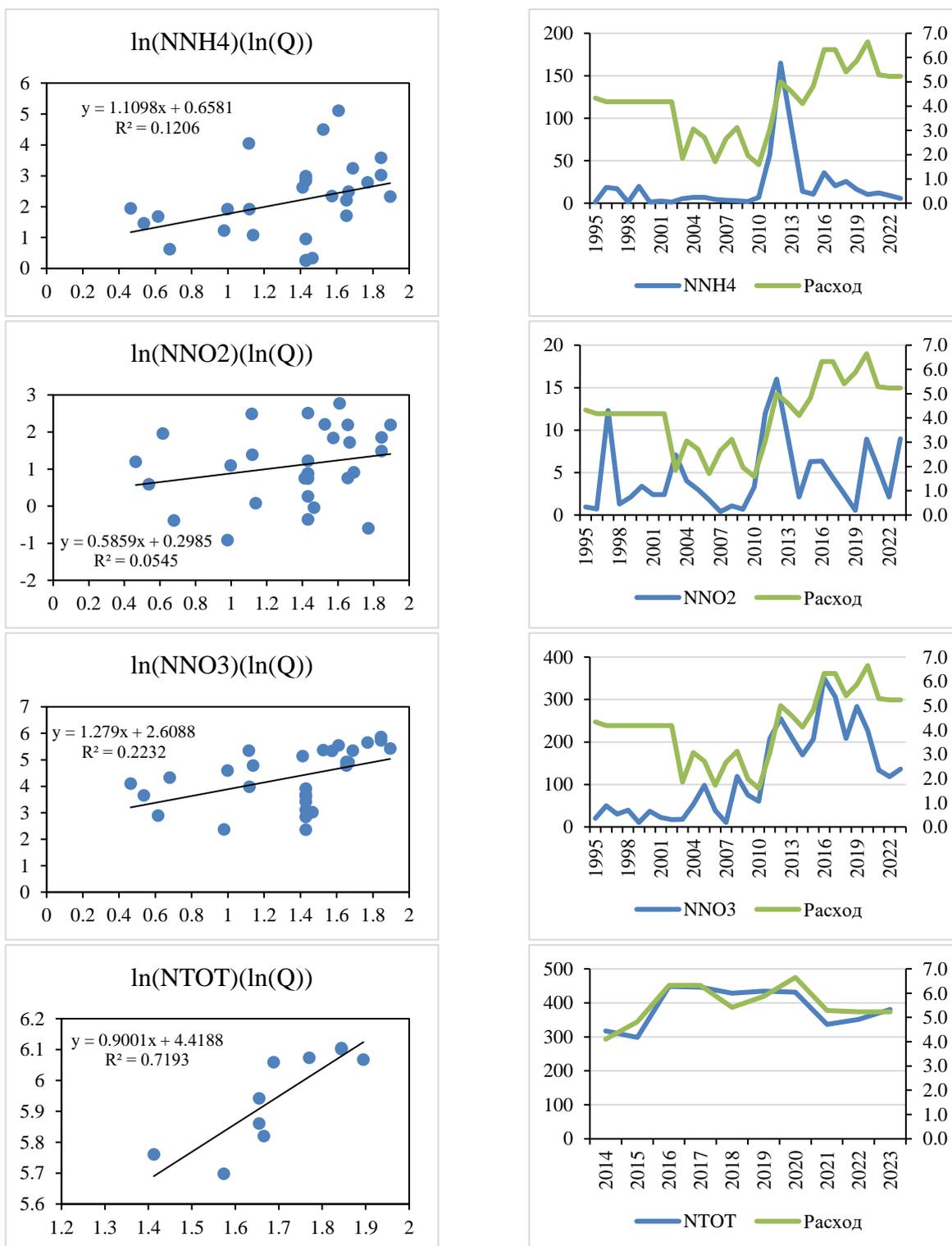


Рисунок Д.1 – Графики логарифмических зависимостей, хронологического хода концентраций и расхода воды, р. Селезневка. (голубым – концентрации веществ, т/год, зеленым – расход воды, м<sup>3</sup>/с).

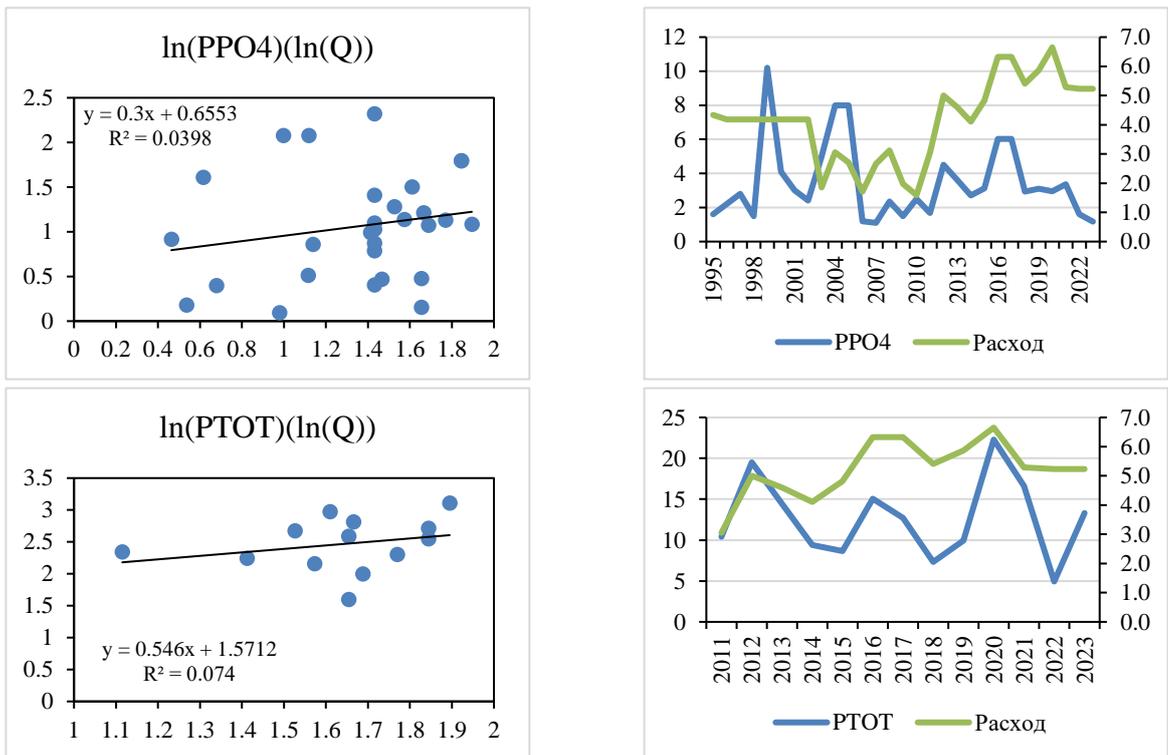


Рисунок Д.2 – Графики логарифмических зависимостей, хронологического хода концентраций и расхода воды, р. Селезневка. (голубым – концентрации веществ, т/год, зеленым – расход воды, м<sup>3</sup>/с).

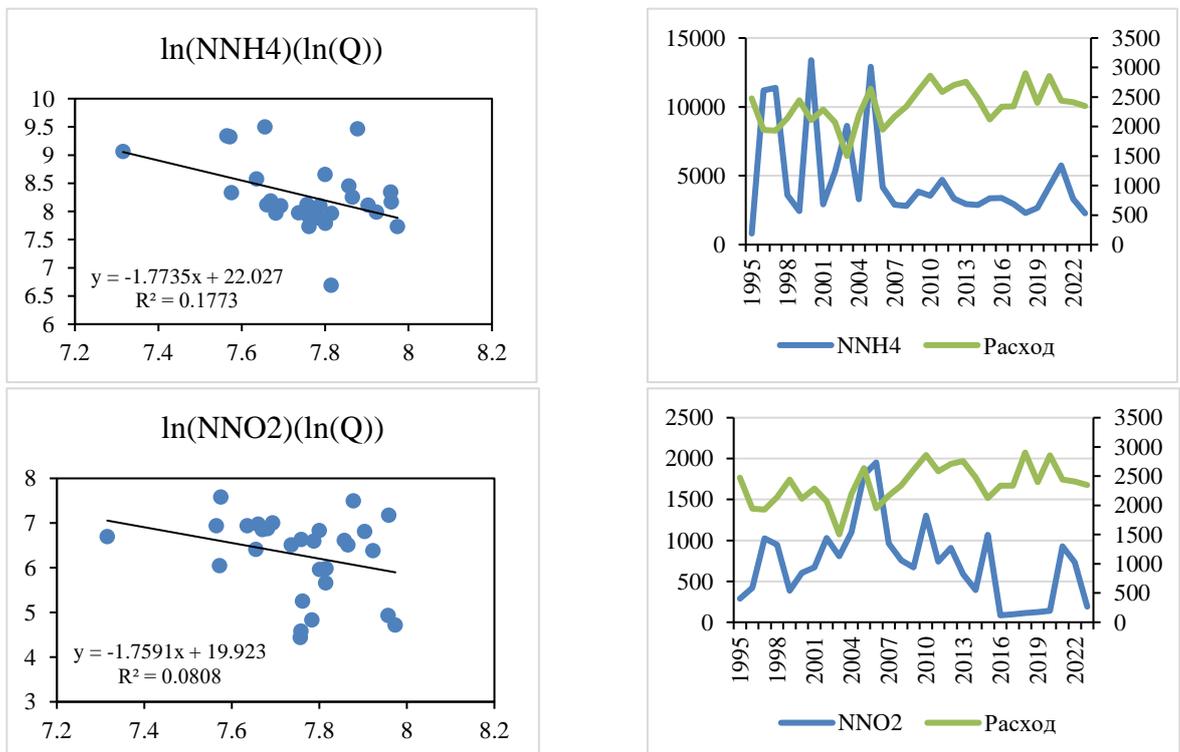


Рисунок Д.3 – Графики логарифмических зависимостей, хронологического хода концентраций и расхода воды, р. Нева. (голубым – концентрации веществ, т/год, зеленым – расход воды, м<sup>3</sup>/с).

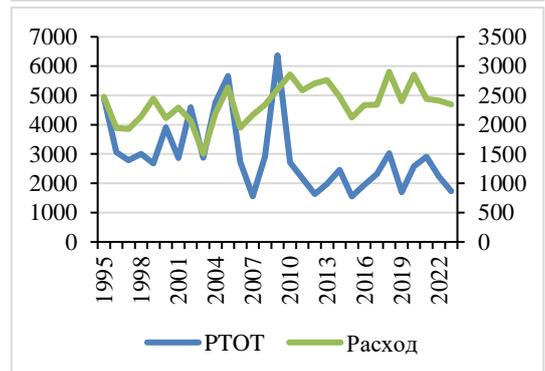
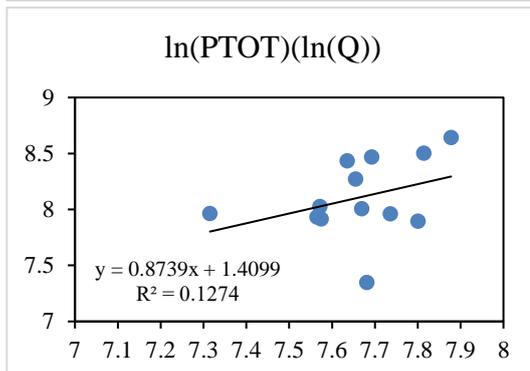
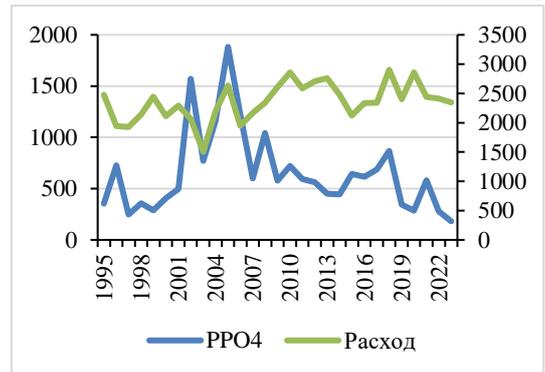
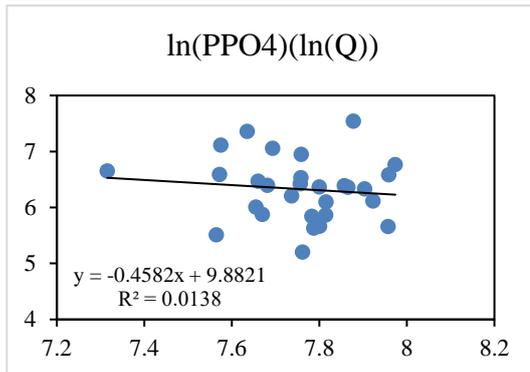
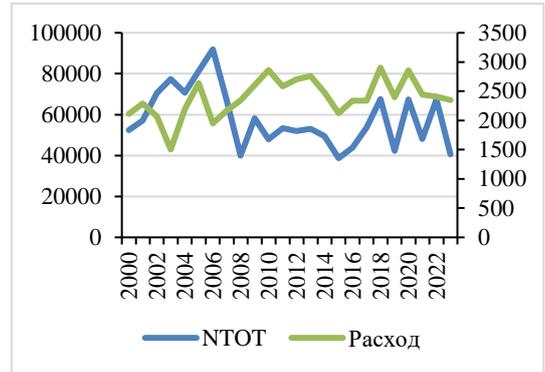
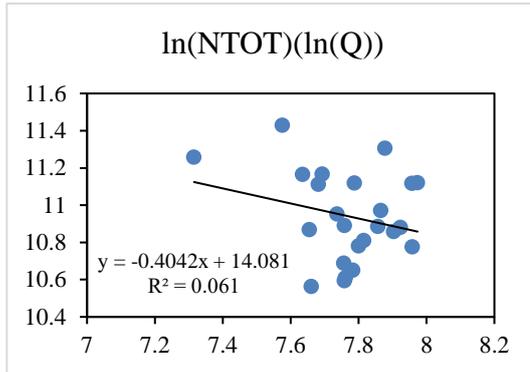
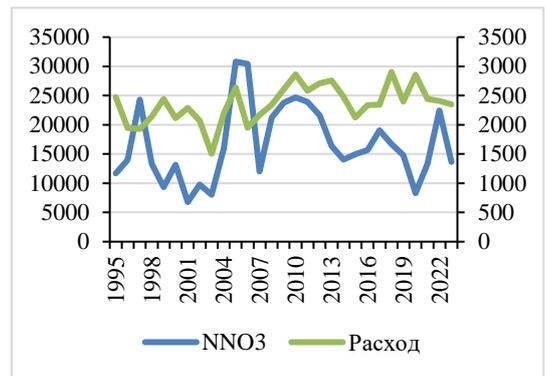
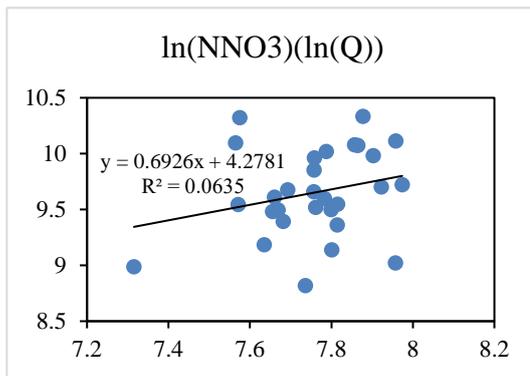


Рисунок Д.4 – Графики логарифмических зависимостей, хронологического хода концентраций и расхода воды, р. Нева. (голубым – концентрации веществ, т/год, зеленым – расход воды, м<sup>3</sup>/с).

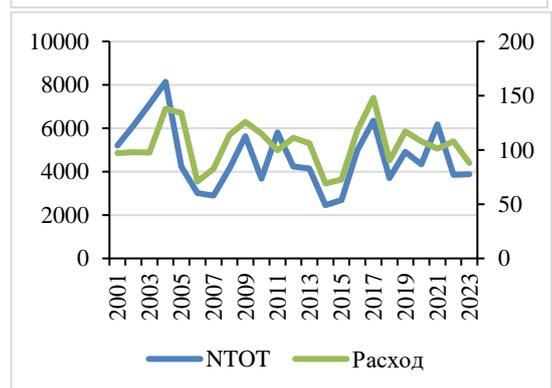
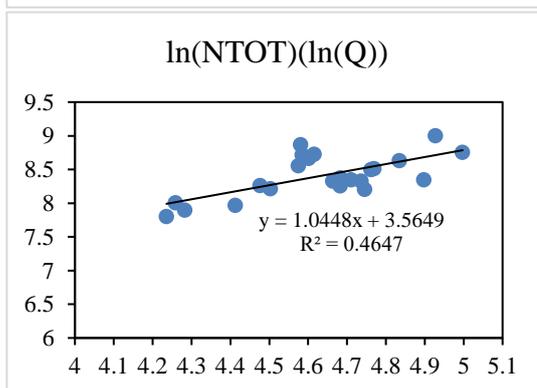
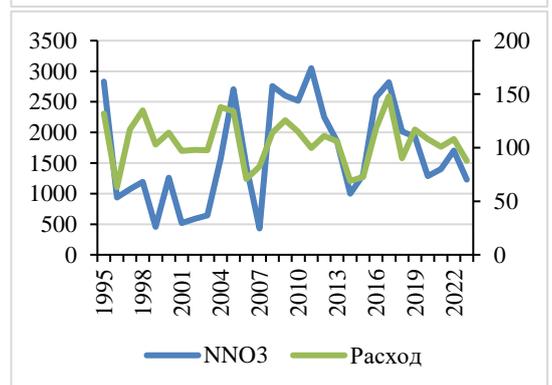
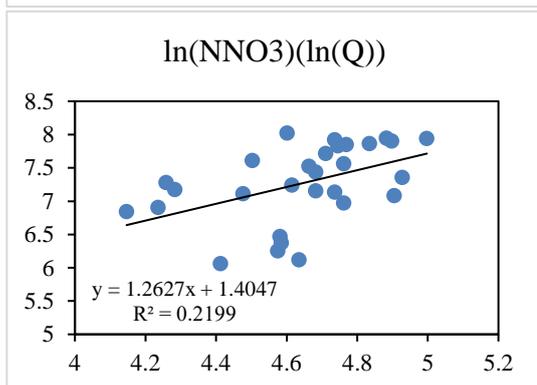
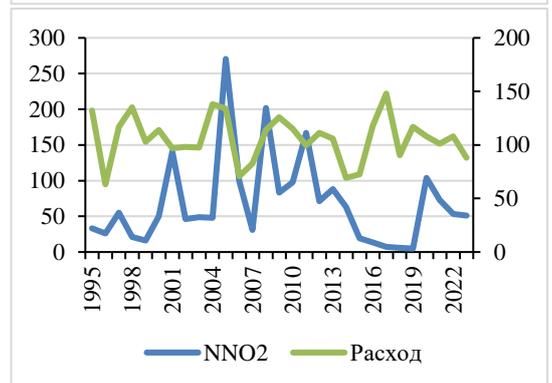
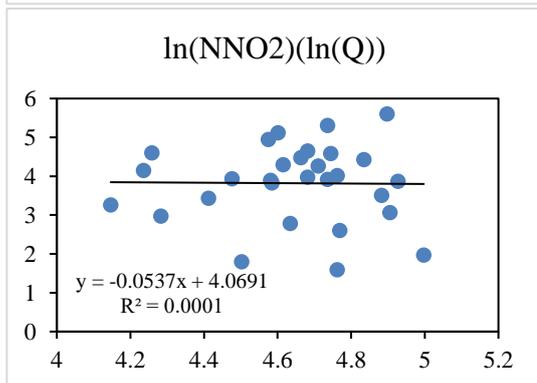
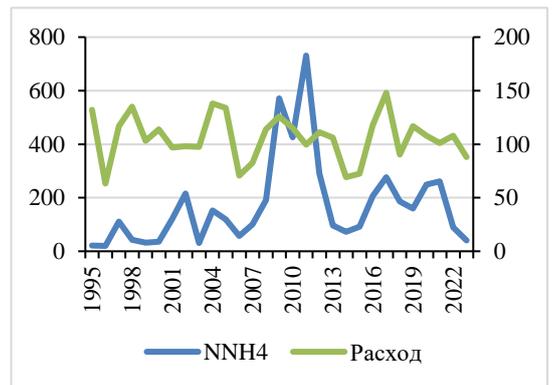
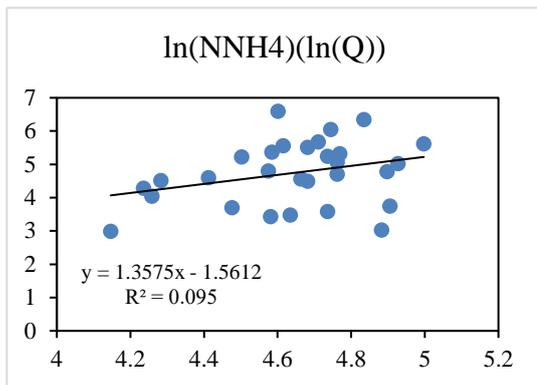


Рисунок Д.5 – Графики логарифмических зависимостей, хронологического хода концентраций и расхода воды, р. Луга. (голубым – концентрации веществ, т/год, зеленым – расход воды, м<sup>3</sup>/с).

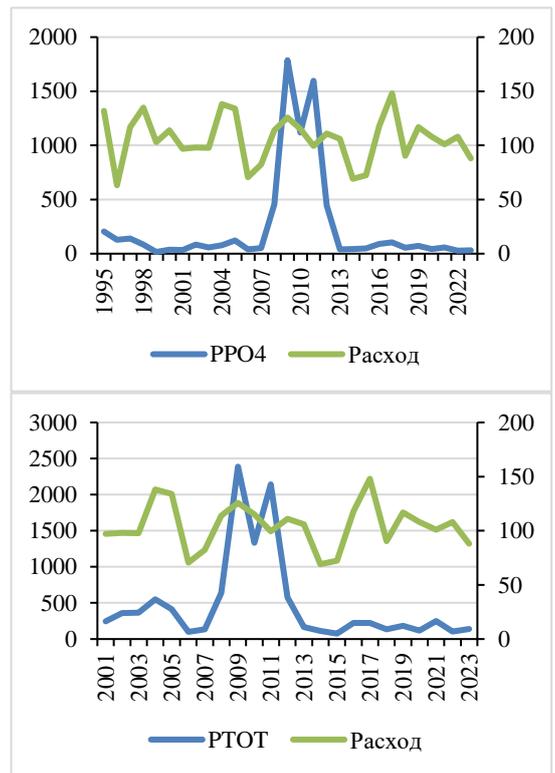
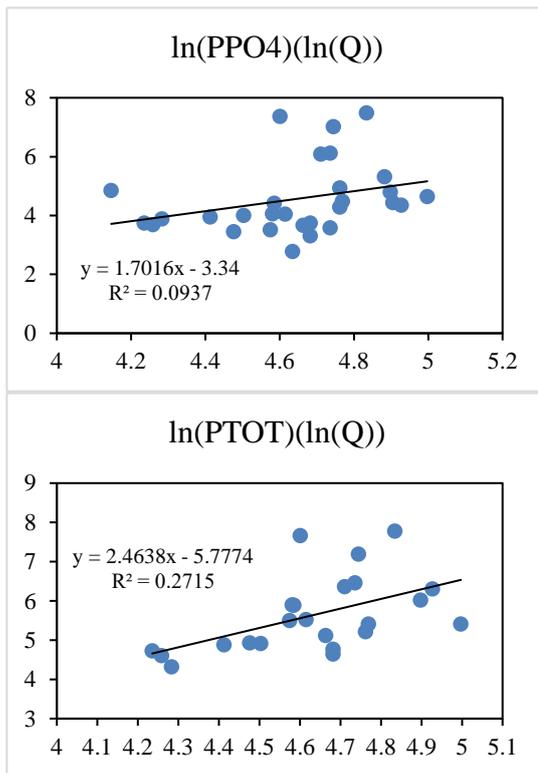


Рисунок Д.6 – Графики логарифмических зависимостей, хронологического хода концентраций и расхода воды, р. Луга. (голубым – концентрации веществ, т/год, зеленым – расход воды, м³/с).

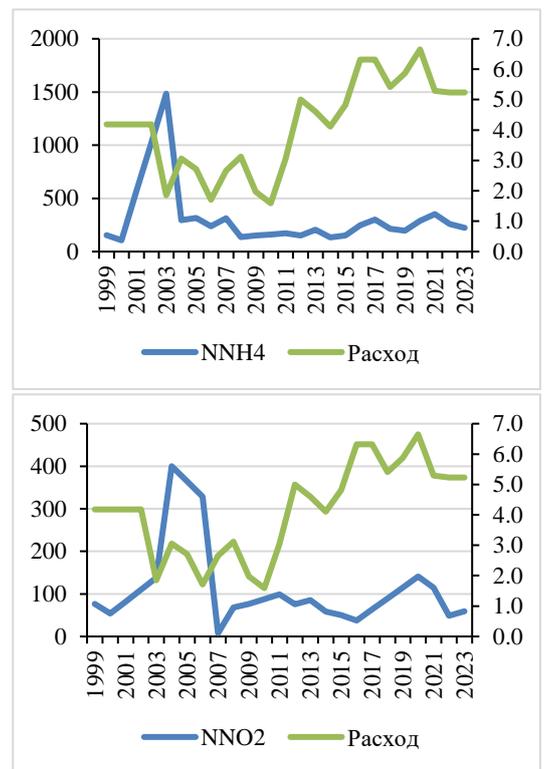
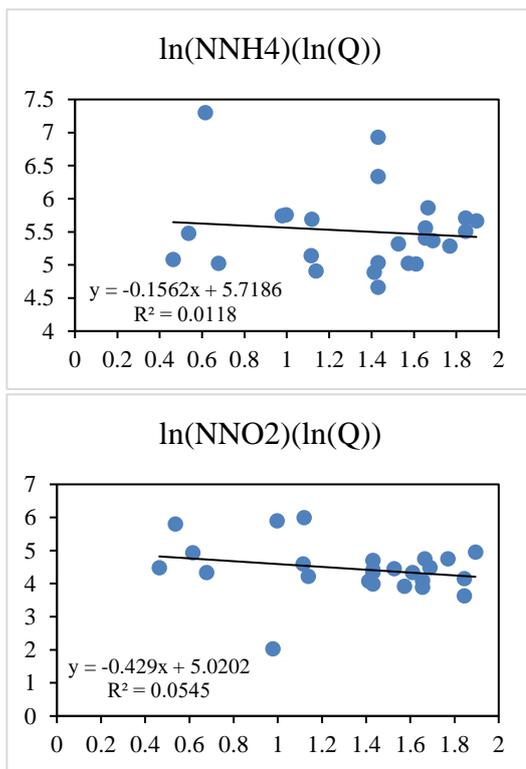


Рисунок Д.7 – Графики логарифмических зависимостей, хронологического хода концентраций и расхода воды, р. Нарва. (голубым – концентрации веществ, т/год, зеленым – расход воды, м³/с).

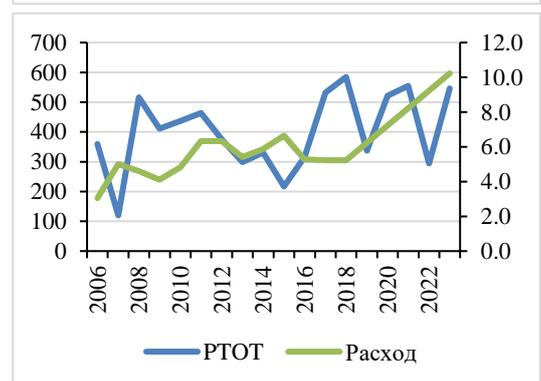
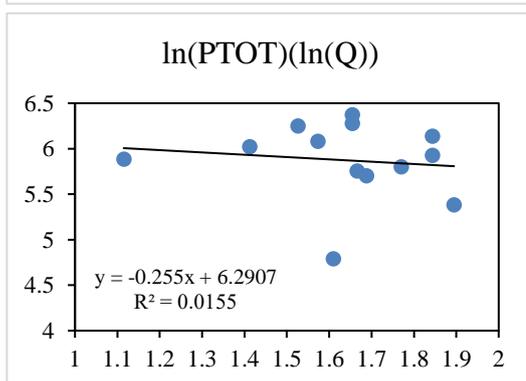
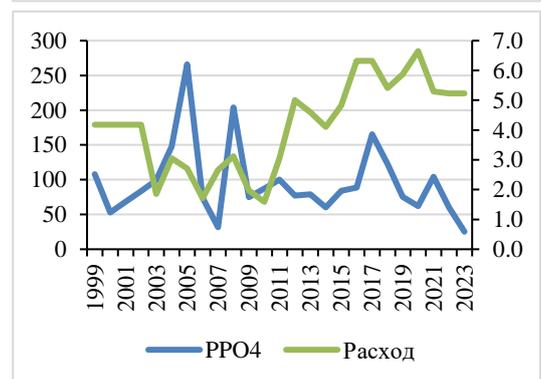
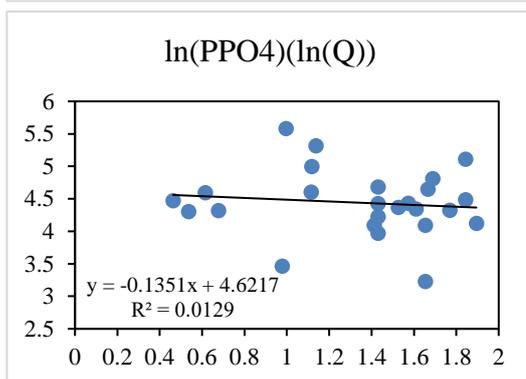
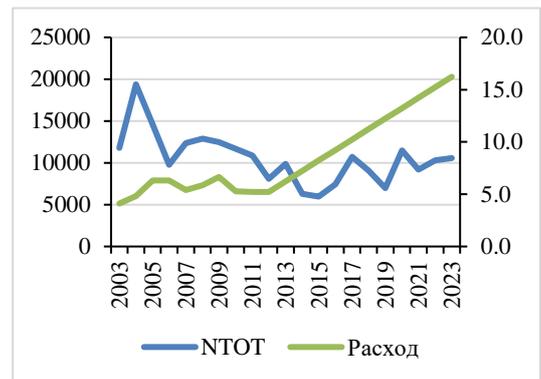
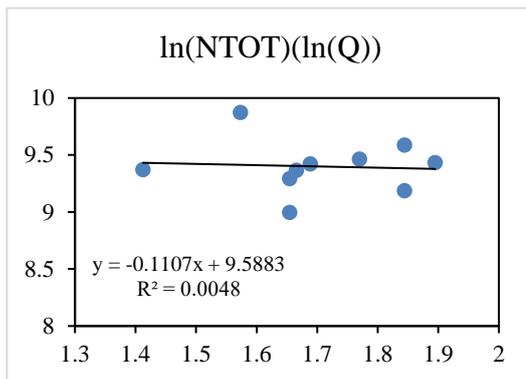
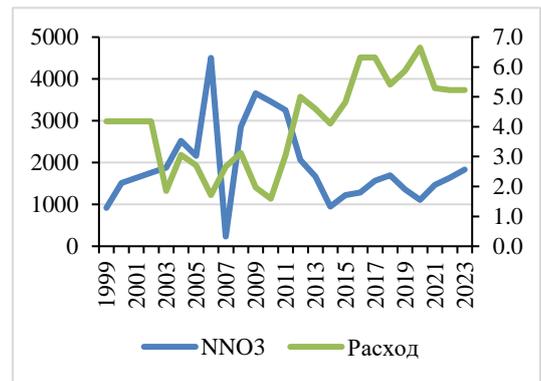
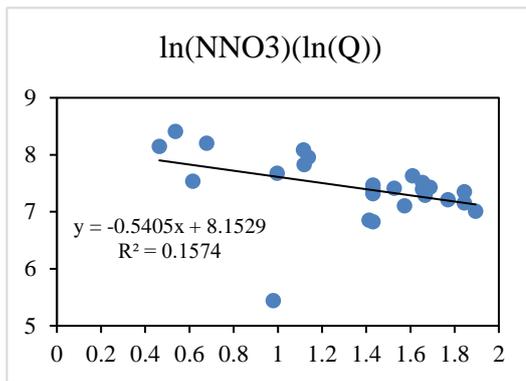


Рисунок Д.8 – Графики логарифмических зависимостей, хронологического хода концентраций и расхода воды, р. Нарва. (голубым – концентрации веществ, т/год, зеленым – расход воды, м<sup>3</sup>/с).

ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ по методу Манна-Кендалла

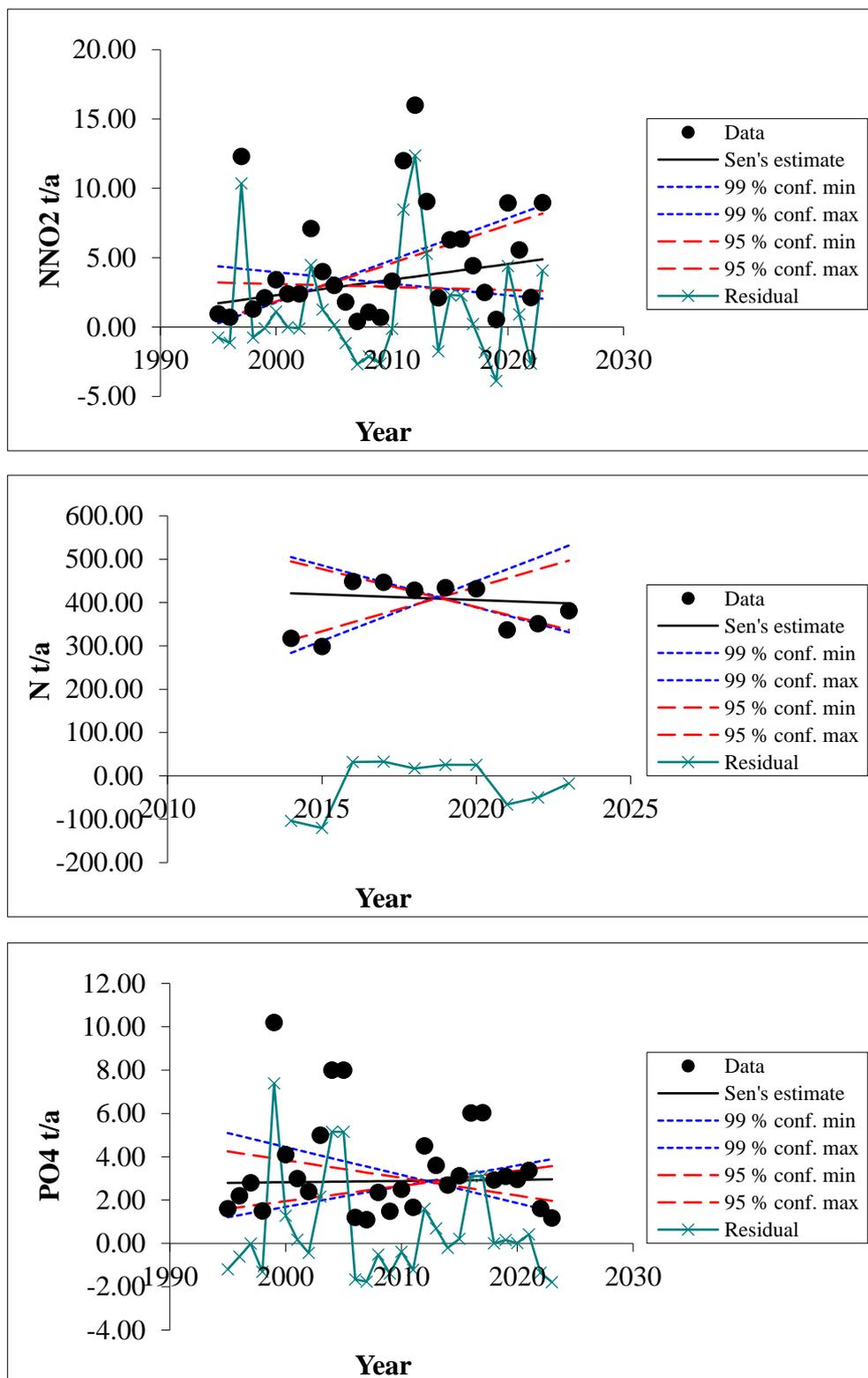


Рисунок Е.1 – Графики трендов биогенных показателей, р. Селезневка. NNO<sub>2</sub> – нитритный азот, т/год, N – общий азот, т/год, PO<sub>4</sub> – фосфатный фосфор, т/год.

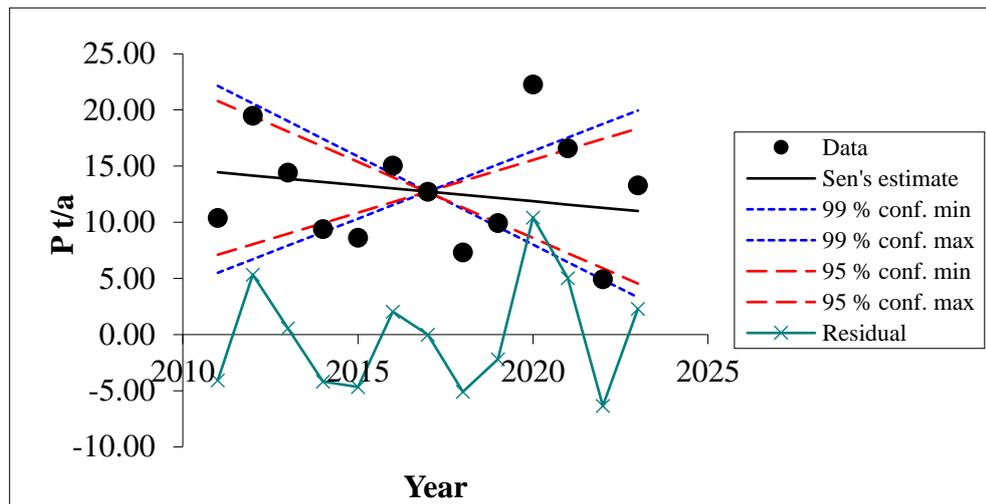


Рисунок Е.2 – Графики трендов биогенных показателей, р. Селезневка.  
 Р – общий фосфор, т/год.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ по методу Манна-Кендалла

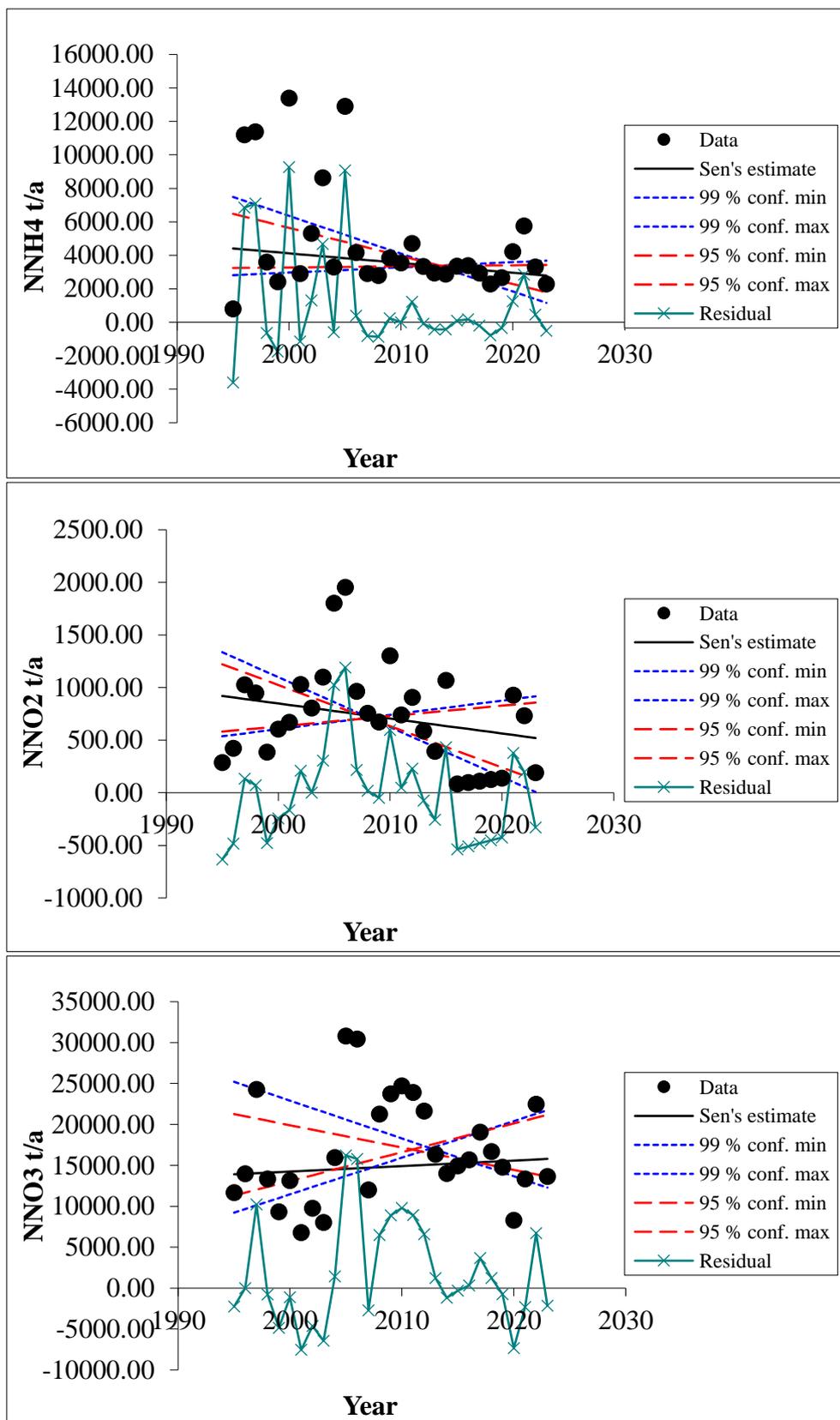


Рисунок Ж.1 – Графики трендов биогенных показателей, р. Нева.  
 $\text{NNH}_4$  – аммонийный азот, т/год,  $\text{NNO}_2$  – нитритный азот, т/год,  $\text{NNO}_3$  – нитратный азот, т/год.

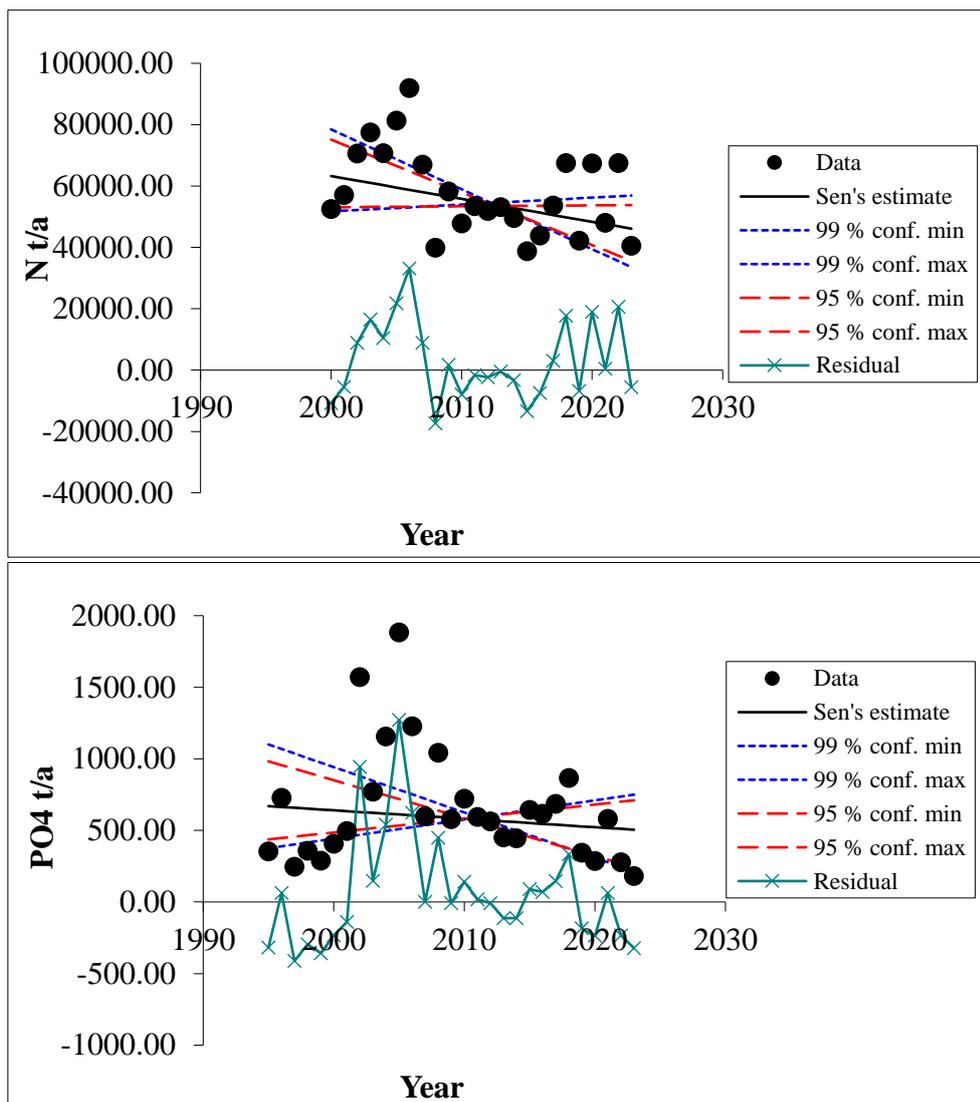


Рисунок Ж.2 – Графики трендов биогенных показателей, р. Нева.  
 N – общий азот, т/год, PO<sub>4</sub> – фосфатный фосфор, т/год.

ПРИЛОЖЕНИЕ И – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ по методу Манна-Кендалла

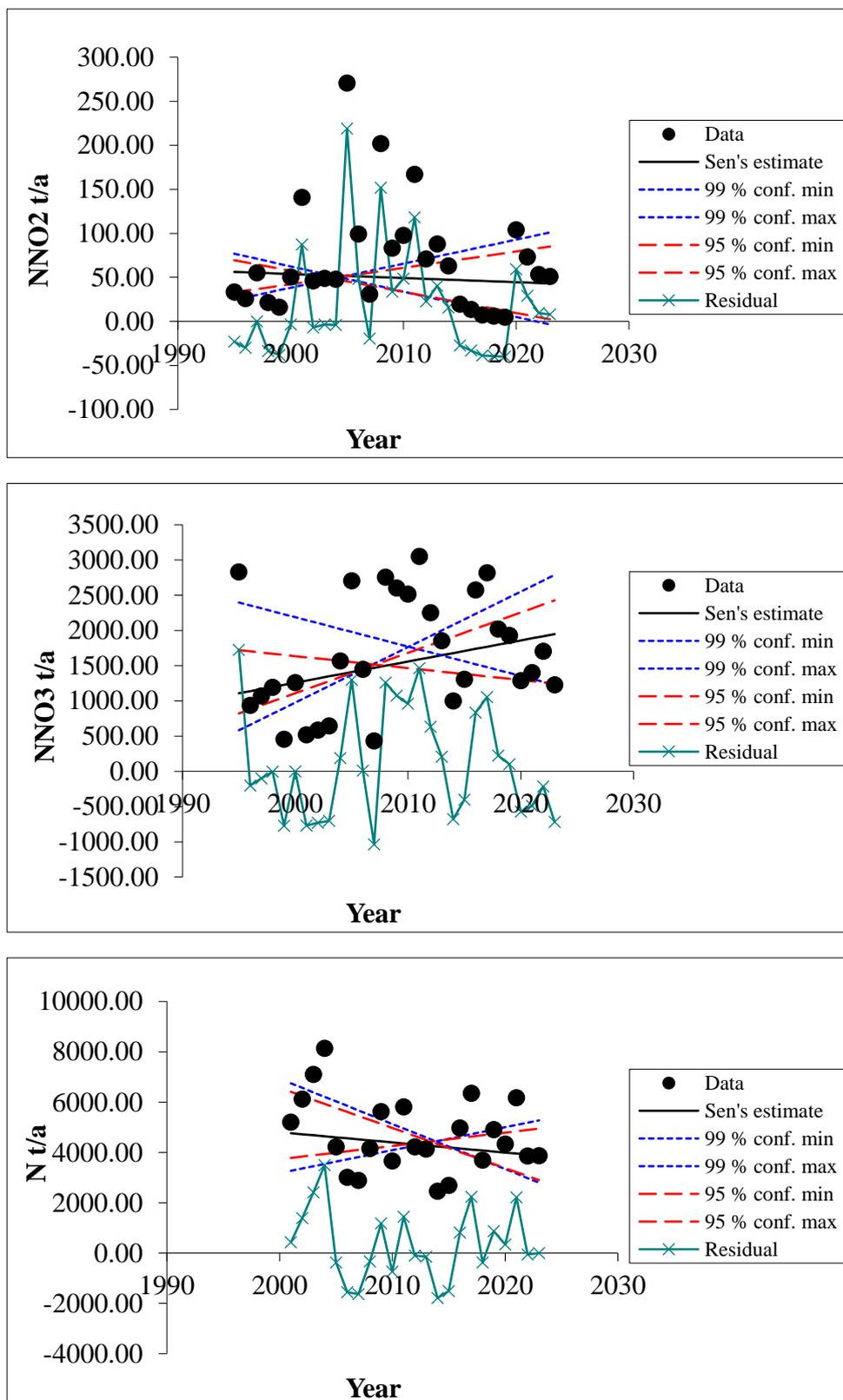


Рисунок И.1 – Графики трендов биогенных показателей, р. Луга.  
 $NNO_2$  – нитритный азот, т/год,  $NNO_3$  – нитратный азот, т/год, N – общий азот, т/год.

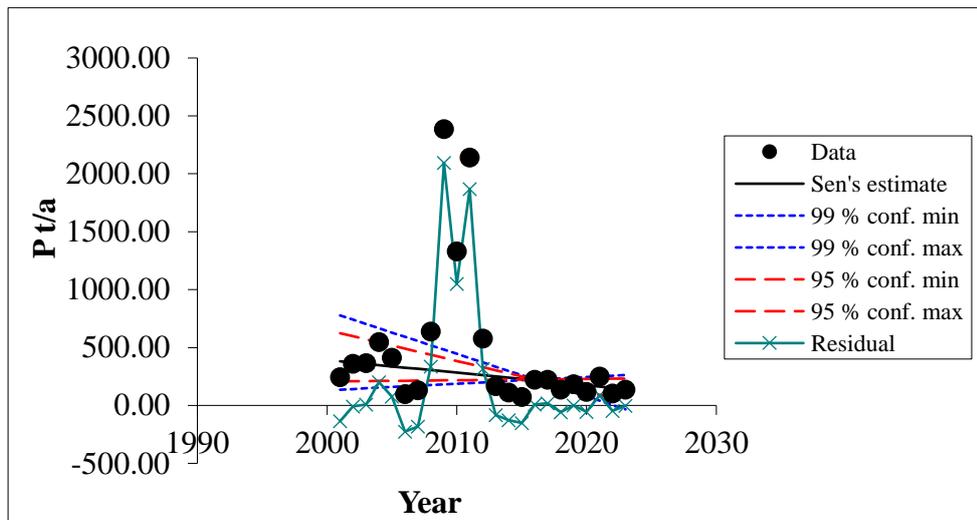
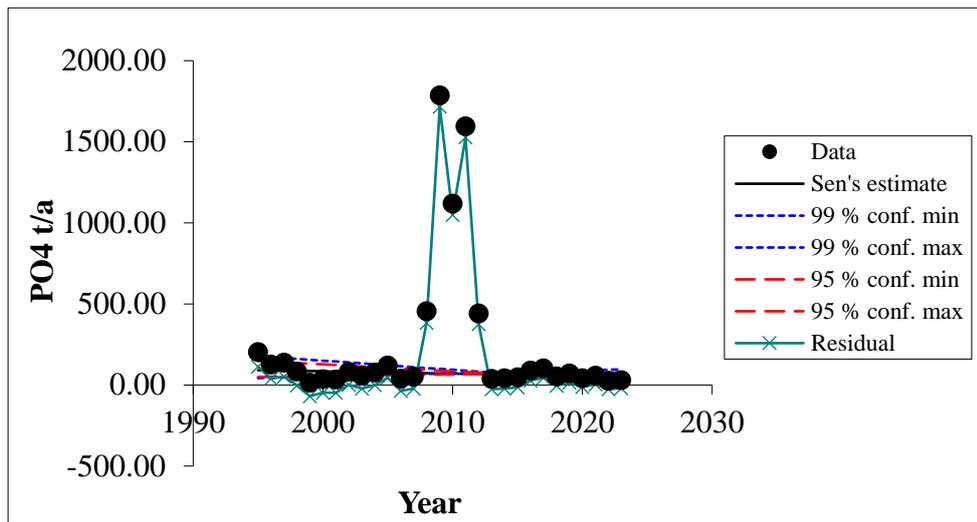


Рисунок И.2 – Графики трендов биогенных показателей, р. Луга.  
 PO<sub>4</sub> – фосфатный фосфор, т/год, P – общий фосфор, т/год.

ПРИЛОЖЕНИЕ К – Хронологические графики концентраций загрязняющих веществ по методу Манна-Кендалла

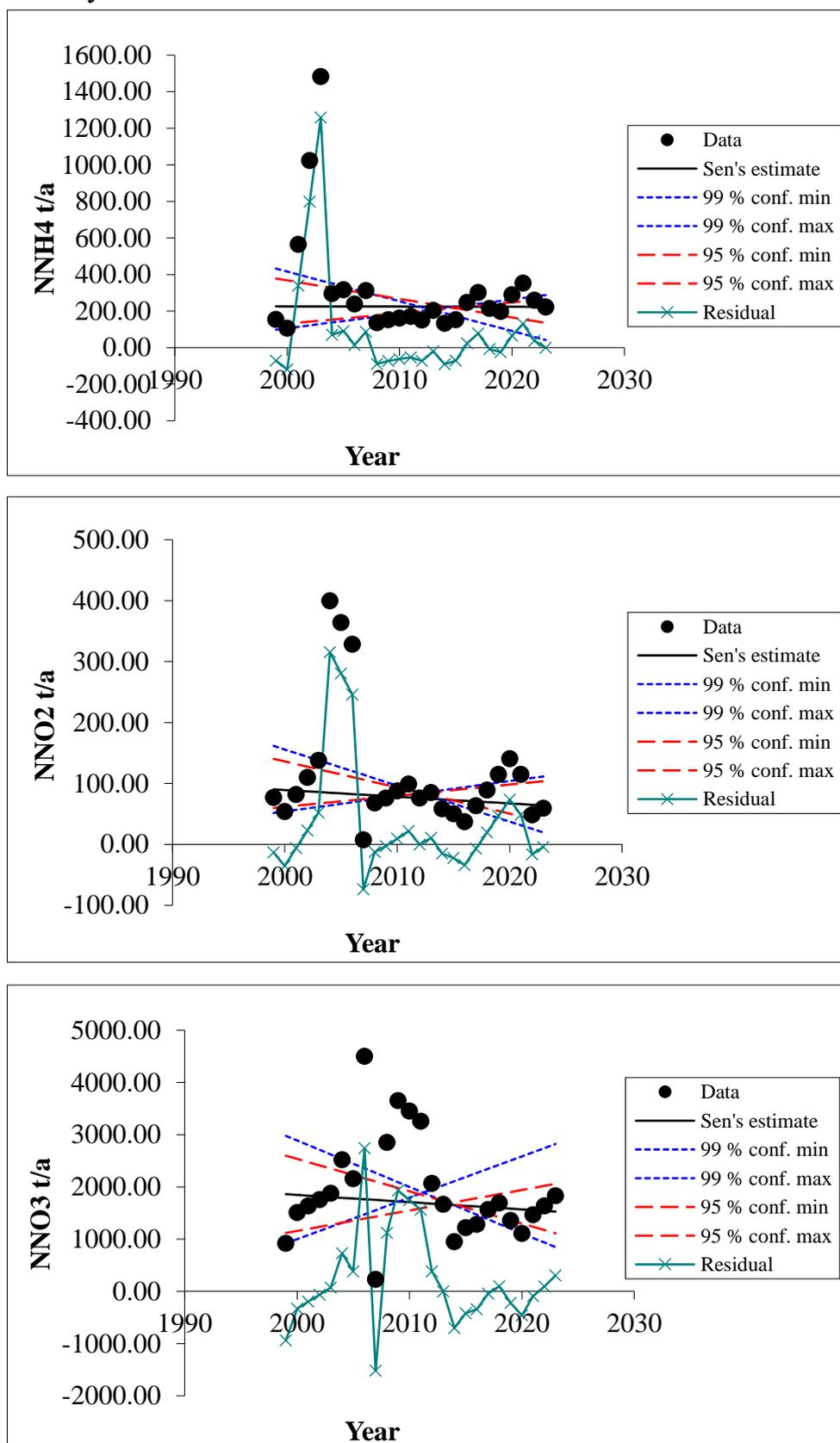


Рисунок К.1 – Графики трендов биогенных показателей, р. Нарва.  $\text{NNH}_4$  – аммонийный азот, т/год,  $\text{NNO}_2$  – нитритный азот, т/год,  $\text{NNO}_3$  – нитратный азот, т/год.

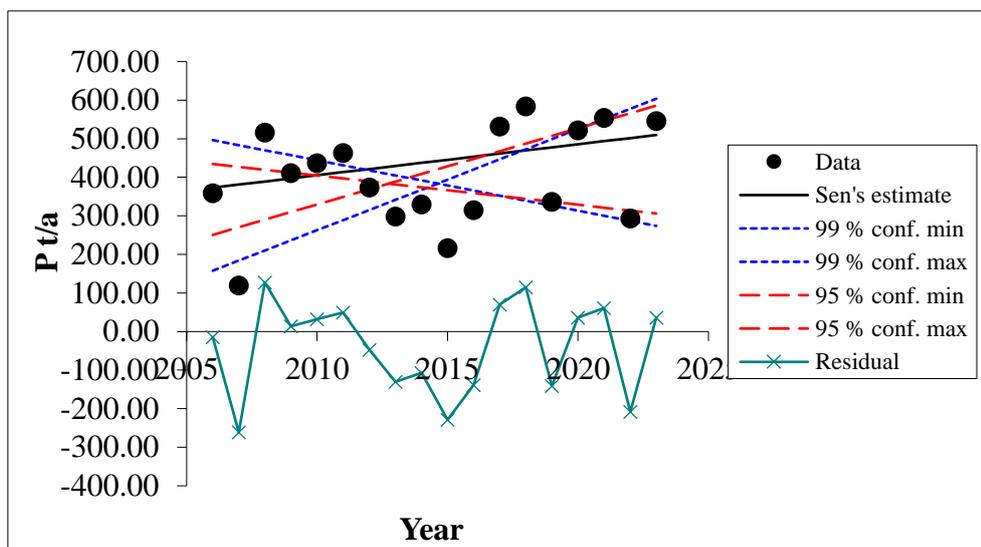
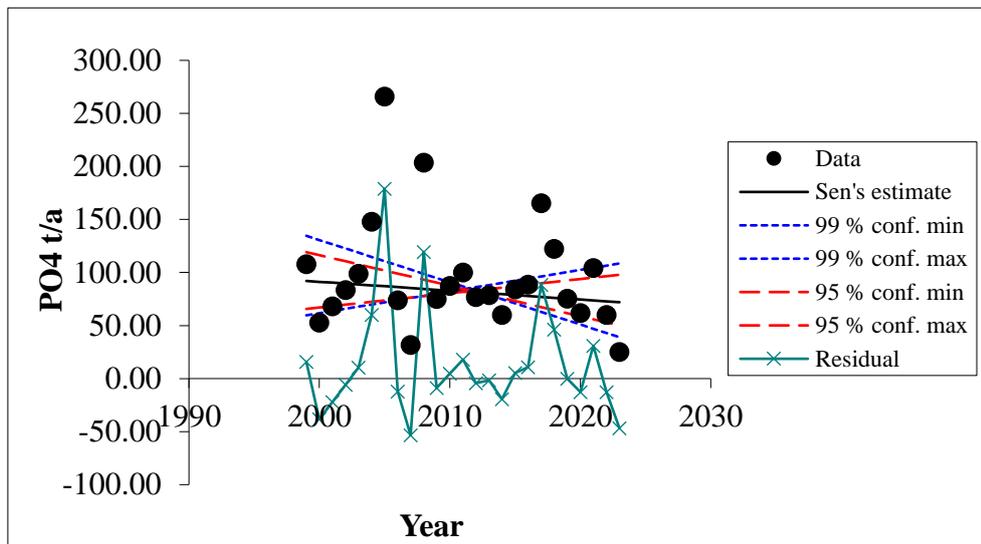


Рисунок К.2 – Графики трендов биогенных показателей, р. Нарва.  
 $PO_4$  – фосфатный фосфор, т/год, P – общий фосфор, т/год.