

На правах рукописи

Пунгин Артём Викторович

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО
ВОЗДУХА ГОРОДА КАЛИНИНГРАДА МЕТОДОМ
ЛИХЕНОИНДИКАЦИИ**

25.00.36 – геоэкология (науки о Земле)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Калининград – 2018

Работа выполнена в Институте живых систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

Научный руководитель: **Дедков Виктор Павлович,**
доктор биологических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Груздев Владимир Станиславович,**
доктор географических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет по землеустройству», архитектурный факультет, кафедра строительства, заведующий кафедрой

Бедарева Ольга Михайловна,
доктор биологических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», факультет биоресурсов и природопользования, кафедра агропочвоведения и агроэкологии, заведующая кафедрой

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»**

Защита диссертации состоится «15» февраля 2019 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.084.09 при ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» по адресу: 236022, г. Калининград, ул. Зоологическая, 2, ауд. 304, e-mail: tikuznetsova@kantiana.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (г. Калининград, ул. Университетская, д. 2). Электронные версии диссертации и автореферата размещены на официальном сайте ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» <https://www.kantiana.ru/postgraduate/dis-list/232936/>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук

Т.Ю. Кузнецова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В связи с урбанизацией и все возрастающим антропогенным прессом на урбогеосистемы, одной из первоочередных задач геоэкологии является изучение биоиндикаторов состояния городской среды. В целях обеспечения экологической безопасности городского населения повсеместно проводится геоэкологический мониторинг состояния атмосферного воздуха с применением физико-химических и биоиндикационных методов анализа. В качестве биоиндикаторов уже более пятидесяти лет используются симбиотические организмы – лишайники [Бязров, 2002; Nimis, Purvis, 2002]. Благодаря анатомо-морфологическому строению они достаточно быстро реагируют на изменения качественных и количественных показателей воздушной среды.

В России лишеноиндикационные исследования проведены во многих городах – Екатеринбурге [Пауков, 2001], Москве [Бязров, 2002], Санкт-Петербурге [Малышева, 2003, 2005а, 2005b] и др. Однако в г. Калининграде, несмотря на то, что первые данные о видовом разнообразии лишайников были опубликованы немецкими ботаниками в XIX веке [Ohlert, 1863], комплексной оценки качества атмосферного воздуха с использованием методов лишеноиндикации до настоящего времени не проводились.

Степень разработанности темы. Начиная с 1960-х годов, после того как диоксид серы (SO_2) был признан ключевым фактором, влияющим на физиологические и биохимические показатели лишайников и на их видовое разнообразие [Nimis, Purvis, 2002], началось активное использование лишеноиндикационных методов в мониторинге состояния приземной городской атмосферы.

На основе данных о видовом разнообразии, встречаемости и проективном покрытии лишайников были разработаны синтетические индексы: полеотолерантности (I.P.) [Trass, 1973]; атмосферной чистоты (I.A.P.) [Le Blanc, De Sloover, 1970], степени качества воздуха (LGW) [VDI, 1995] и развития эпифитных лишайников (ИРЭЛ - IDEL) [Бязров, 2002]. Разработан ряд современных методик для оценки качества воздуха в условиях загрязнения азотсодержащими поллютантами [VDI, 2005; 2015].

Общепризнано, что на лишайники, помимо двуокиси серы, оказывает воздействие широкий спектр веществ и факторов, включая фтор, щелочную пыль, металлы и радионуклиды, хлорированные углеводороды,

эвтрофикацию, «кислотные дожди» и др. [Kirschbaum, Windisch, 1995; Lichen biology, 2008; Insarov, Schroeter, 2002; van Herk et al., 2002].

В последней четверти XX в. концентрации кислотных загрязнителей в атмосферном воздухе, благодаря повышению уровня научно-технического развития, начали снижаться [VDI, 2005]. Однако во многих городах мира происходят массовые выбросы в атмосферу химически активных форм азота (аммиак, аммоний, оксиды азота, азотная кислота, нитраты и др.) от промышленных предприятий и автотранспорта, приводящие к эвтрофикации воздуха [Galloway et al., 2008; Моклячук и др., 2014; Reaktiver Stickstoff..., 2015].

Несмотря на то, что азот является важным биологическим макроэлементом, попадая в организм в более высоких, чем требуется дозах, данный элемент берет на себя роль токсиканта, приводящего к гибели отдельных чувствительных видов растений и лишайников, изменению видового разнообразия территорий [Nauck, 2010; Carter et al., 2017]. Некоторые авторы предлагают альтернативное объяснение процессов смещения лишенофлор урбанизированных территорий в сторону нитрофитных видов, связанное с эффектом осмотического стресса, вызванного поступлением солей (нитрат аммония, хлорид натрия) в таллом лишайников и изменением микроклиматических условий мест их обитания [Frahm, Janßen et al., 2009; Frahm et al., 2009].

В понимании того, как лишайники реагируют на увеличение азотсодержащих поллютантов остается много пробелов [Nauck, 2010; Carter et al., 2017]. Изменения качественного характера загрязнения атмосферного воздуха, снижение уровня воздействия кислотных загрязнителей на видовое разнообразие лишайников и их функционирование в условиях урбоэкосистем обусловили значимость дальнейшей проработки этих вопросов.

Объект исследования: эпифитные лишайники городской среды.

Предмет исследования: пространственное разнообразие геоэкологических состояний городской воздушной среды.

Цель исследования – геоэкологическая оценка состояния атмосферного воздуха г. Калининграда методом лишеноиндикации в условиях загрязнения эвтрофицирующими веществами.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

— выявить видовое разнообразие и провести анализ эпифитной лишенофлоры города Калининграда;

— провести лишеноиндикационное картирование городских территорий для оценки качества атмосферного воздуха с применением методики VDI 3957 Blatt 13 и VDI 3957 Blatt 18;

— оценить воздействие загрязнения воздуха на видовое разнообразие лишайников, биохимические и физиологические параметры индикаторного вида *Parmelia sulcata* Taylor;

— произвести оценку загрязнения городского атмосферного воздуха эвтрофицирующими веществами;

— выявить изменения химического состава коры деревьев-форофитов в условиях загрязнения атмосферного воздуха;

— оценить геоэкологический статус загрязнения атмосферного воздуха эвтрофицирующими соединениями в функциональных зонах Калининграда.

Научная новизна работы. Впервые выполнена картографическая оценка состояния атмосферного воздуха г. Калининграда с применением методов лишеноиндикации. Произведен комплексный анализ влияния загрязнения воздуха эвтрофицирующими соединениями на видовое разнообразие эпифитной лишенофлоры, физиологические и биохимические характеристики лишайников. Впервые для Калининграда выявлен видовой состав и структура эпифитных лишайников, проведен ее подробный анализ. На территории города было обнаружено три новых вида для региона – *Punctelia jeckeri* (Roum.) Kalb, *Punctelia subrudecta* (Nyl.) Krog и *Xanthomendoza fulva* (Hoffm.) Söchting, Kärnefelt & S. Kondr., а также установлены местообитания листоватого лишайника *Flavoparmelia caperata* (L.) Hale, считавшегося исчезнувшим. Установлено снижение видового разнообразия, изменения биохимических и физиологических параметров индикаторного вида лишайника *Parmelia sulcata* в условиях городской воздушной среды.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты по трансформации видового разнообразия, распространения и экологии лишайников в условиях загрязнения городской воздушной среды существенно дополняют имеющиеся литературные сведения. Новые данные о распространении и экологии лишайников могут быть использованы при переиздании Красной книги Калининградской области. Результаты исследования внедрены в учебный процесс Института живых систем БФУ им. И. Канта и используются в курсах «Спецпрактикум по НИР», «Прикладная экология и конструирование экосистем» и при проведении учебных практик. Предложена апробированная методика использования

содержания хлорофилла *a* в талломах *Parmelia sulcata* для оценки загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных территорий эвтрофицирующими соединениями. Полученные результаты могут быть основой для разработки программы долговременного геоэкологического мониторинга состояния атмосферного воздуха г. Калининграда.

Методология и методы исследования. В работе использовались общенаучные (анализ, сравнение, классификация, эксперимент) и специальные методы геоэкологических исследований – картографический, геохимический, статистический. Геоэкологическая оценка состояния городского атмосферного воздуха проводилась с применением сопряженного анализа видового разнообразия эпифитной лишенофлоры, физиологических и биохимических параметров индикаторного вида *P. sulcata* с применением современных методик лишеноиндикационного картирования (VDI 3957 Blatt 13, VDI 3957 Blatt 18) и физико-химических методов анализа – спектрофотометрии, элементного анализа, кондуктометрии, pH-метрии. Статистический анализ совокупности экспериментальных данных проводился с помощью программных средств: Microsoft Excel 2010, IBM SPSS Statistics Base. Визуализация пространственных данных осуществлялась с использованием ГИС-системы (Quantum GIS 2.18).

Положения, выносимые на защиту:

1. В городе Калининграде по сравнению с сопредельными фоновыми территориями наблюдается увеличение, как доли видов-индикаторов эвтрофикации от общего числа видов в квадрате исследования, так и среднего числа видов на одном дереве-форофите, и снижаются значения по данным показателям для референтных лишайников.

2. Увеличение содержания пигментов в талломе *Parmelia sulcata* на различных участках города с разным состоянием атмосферного воздуха наряду с относительно постоянным значением коэффициента феофитинизации хлорофилла, свидетельствует об отсутствии в Калининграде заметного влияния кислотных поллютантов на фотосинтетическую систему лишайника.

3. Различия в содержании хлорофилла *a* и его связь с уровнем азота в талломе *Parmelia sulcata* на участках с разным уровнем загрязнения воздуха, позволяет использовать содержание основного фотосинтетического пигмента в качестве тест-системы для проведения биоиндикационных исследований с целью оценки загрязнения атмосферного воздуха эвтрофицирующими веществами.

4. В условиях Калининграда физиолого-биохимические параметры *Parmelia sulcata* и видовое разнообразие эпифитных лишайников тесно связаны с воздействием автомобильного транспорта, что также определяет геоэкологический статус состояния функциональных зон города.

Достоверность и апробация результатов. Достоверность полученных результатов определяется использованием современных методик лишеноиндикационного картирования, аналитического оборудования с высокой чувствительностью, применением статистических методов обработки данных и ГИС-технологий картографической визуализации.

Результаты исследования были представлены на многих конференциях: XXI международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (Москва, 2014), Workshop über Biomonitoring mit Höheren Pflanzen (Линц, Австрия, 2017), Заседание рабочей группы Ассоциации немецких инженеров (VDI) NA 134-03-03-03 UA «Wirkungsfeststellung an Niederen Pflanzen» (Гиссен, Германия, 2017), Международная научная конференция «Биоразнообразие: подходы к изучению и сохранению» (Тверь, 2017), IV (XII) Международная ботаническая конференция молодых учёных в Санкт-Петербурге (2018), Международная научно-практическая конференция «Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование» (Керчь, 2018).

Публикации. По теме исследования опубликовано 12 статей, 4 из них – в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации. В журналах, входящих в библиографические и реферативные базы данных Scopus и Web of Science, опубликовано 5 работ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы, включающего 371 наименование, в том числе 202 на иностранных языках. Общий объем – 204 страницы, включая 77 рисунков, 13 таблиц и 13 приложений.

Благодарности. Выражаю искреннюю благодарность д.б.н., профессору В.П. Дедкову за научное руководство, к.б.н., доценту Д.Е. Петренко – за формирование интереса к удивительным организмам – лишайникам. За помощь в организации сборов полевого материала благодарит коллег и друзей: к.б.н. К.В. Чайку и к.б.н. Л.Н. Скрыпник. Признателен руководству и сотрудникам Института живых систем БФУ им. И. Канта, а также Д.А. Парфеновой за помощь в проведении лабораторных экспериментов и к.г.н., доценту Н.С. Белову за освоение Quantum GIS,

сотрудникам стипендиального фонда Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) за получение исследовательской стипендии и возможность стажировки в Германии, за сотрудничество с удивительным специалистом и наставником – доктором, профессором У. Виндиш (Prof. Dr. rer. nat. U. Windisch), обучившей методам лишеноидикации и предоставившей возможность использования современного оборудования Technische Hochschule Mittelhessen. Также благодарю своих немецких коллег – доктора, профессора У. Киршбаума (Prof. Dr. rer. nat. U. Kirschbaum) за помощь в определении лишайников, ценную научную литературу и оборудование для тонкослойной хроматографии, доктора К. Дольника (Dr. C. Dolnik) и доктора М. Хенца (Dr. M. Henze) за обучение методу тонкослойной хроматографии, С. Эхенауер (S. Eichenauer) за помощь в проведении элементного анализа. Самые теплые слова благодарности выражаю своим родителям и близким за постоянную поддержку. Экспериментальная часть работы выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-34-00149.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор литературы

Кроме сведений о биологии и экологии лишайников [Lichen biology, 2008; Флора ..., 2014; Spribille et al., 2016], приведены краткие очерки истории использования лишайников как индикаторов атмосферного загрязнения [Nimis, Purvis, 2002; Бязров, 2002]. Представлена актуальная информация о проблеме загрязнения окружающей среды химически активными формами азота и эффекте эвтрофикации воздуха, связанного с поступлением в атмосферу большого количества неорганических восстановленных форм азота – аммония (NH_4^+) и аммиака (NH_3), неорганических окисленных форм – азотной кислоты (HNO_3), нитратов (NO_3^-), оксидов азота (NO_x), закиси азота (N_2O) и др. [Galloway et al., 2008; Моклячук и др., 2014; Reaktiver Stickstoff..., 2015; Stevens et al., 2016; Choudhary et al., 2016; Carter et al., 2017]. Особое внимание уделено воздействию химически активных соединений азота на лишайники [Clark et al., 2017; Carter et al., 2017], в частности реакции лишайников нитрофитов и ацидофитов на эвтрофикацию [van Dobben, ter Braak, 1999; Nauck, 2010], толерантности к аммонии и нитратам [Palmqvist, Dahlman, 2006; Hogan et al., 2010; Nauck, 2010; Munzi et al., 2017; Carter et al., 2017]. Рассмотрены закономерности формирования городской лишенофлоры в условиях изменения характера загрязнения атмосферного воздуха [Бязров, 2002; VDI, 2005; Инсаров, Мучник, 2007; Инсаров и др., 2010].

Кратко обсуждаются геоэкологическая характеристика Калининградской области [Дедков, Федоров, 2006; Калининградская область..., 2016; Государственный доклад..., 2017] и природно-климатические условия Калининграда [Баринаова, Кохановская, 2015; Мурачева, 2015; Наумов, 2016; Государственный доклад..., 2017]. Представлена информация об истории изучения лишайников в Калининграде [Ohlert, 1863, 1973; Lettau, 1912, 1919; Дедков и др., 2007], приведён аннотированный список, насчитывающий 49 видов [Пунгин, Петренко, 2013]. Представлена информация о загрязнении атмосферного воздуха в г. Калининграде [Государственный доклад ..., 2017; Баринаова и др., 2017].

Глава 2. Объекты и методы исследования

В г. Калининграде и на трех сопредельных фоновых территориях было обследовано 338 деревьев, на которых изучался видовой состав лишайнобиоты и производился специальный отбор проб лишайника *Parmelia sulcata*. Содержание фотосинтетических пигментов, азота, углерода и фосфора определено во всех пробах *P. sulcata*, химический состав коры деревьев (рН, удельная электропроводность, содержание аммония, нитрата и нитрита) определен для 120 проб.

2.1. Лишеноиндикационные исследования

Для геоэкологической оценки состояния атмосферного воздуха в г. Калининграде была выбрана стандартизированная методика картирования разнообразия эпифитных лишайников VDI 3957 Blatt 13 [VDI, 2005], предназначенная для оценки качества воздуха и влияния эвтрофицирующих соединений. Территория города была разделена на квадраты учета площадью 1 км². Обследование проводилось в весенне-летний период 2016 – 2017 гг. Учет эпифитных лишайников проводился в 39 квадратах, на 5 – 10 деревьях (рисунок 1). Учет лишайников и расчет комбинированного индекса качества воздуха (LGI) проводился согласно методике [VDI, 2005].

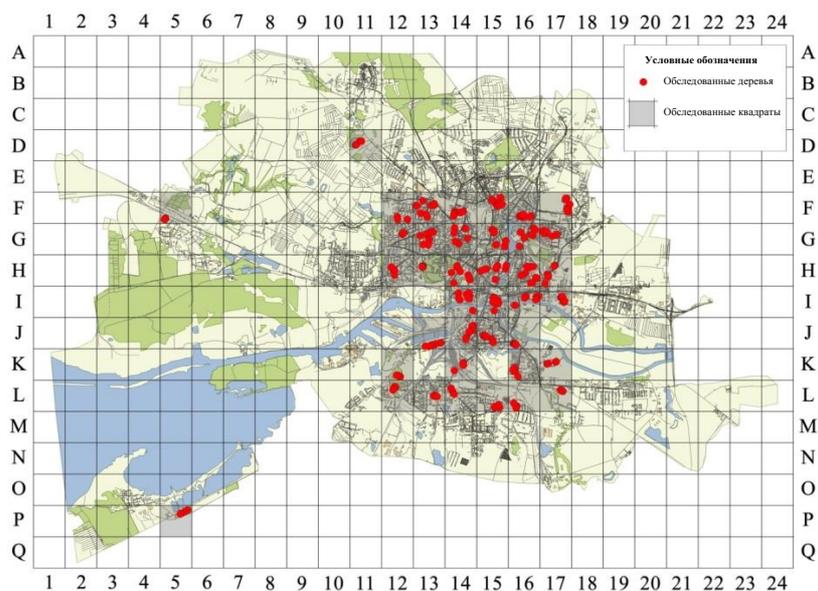


Рисунок 1 – Схема г. Калининграда с указанием обследованных деревьев

Результаты, полученные в г. Калининграде сопоставлялись с тремя фоновыми участками, на которых условно антропогенное воздействие ниже (рисунок 2).

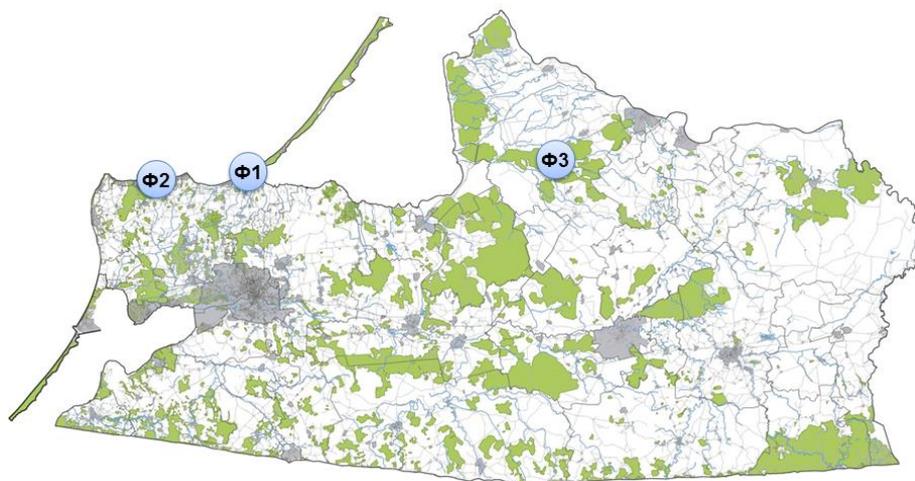


Рисунок 2 – Схема Калининградской области с указанием расположения тестовых участков на фоновых территориях: Ф1 – на окраине г. Зеленоградска, в основании Куршской косы (N54.967980°, E20.497672°); Ф2 – в лесопарковой зоне г. Светлогорска (N54.948269°, E20.167544°); Ф3 – придорожная аллея деревьев пос. Большаково – пос. Гастеллово Славского района (N55.007041°, E21.566228°)

Оценку загрязнения атмосферного воздуха эвтрофицирующими веществами проводили согласно методике VDI 3957 Blatt 18 [VDI, 2015], основанной на свойстве эпифитного, листоватого лишайника *P. sulcata* накапливать азот пропорционально содержанию химически активных соединений этого элемента в атмосферном воздухе. Сбор образцов *P. sulcata* проводился одновременно с учетом видового разнообразия эпифитной лишайнофлоры; пробоподготовка соответствовала требованиям методики [VDI, 2015]. Анализ содержания азота, а также углерода в талломах

лишайников был выполнен в декабре 2017 г. на базе Высшей технической школы среднего Хессена (Technische Hochschule Mittelhessen) Гиссен, Германия, на элементном CHNS-анализаторе «Elementar Vario EL cube» с использованием в качестве референтного материала сульфаниламида (S15.00-0062 Sulfanilamide).

Для каждого обследованного квадрата на изучаемых участках было рассчитано среднее значение содержания азота по всем проанализированным образцам талломов *P. sulcata*. Оценку состояния атмосферного воздуха проводили согласно таблице 1, по трем уровням загрязнения – низкий, средний и высокий [VDI, 2015].

Таблица 1 – Оценка загрязнения атмосферного воздуха эвтрофицирующими веществами по содержанию азота в талломе *P. sulcata* [VDI, 2015]

Содержание азота, %	Уровень загрязнения	Ориентировочные значения		
		среднегодовой концентрации диоксида азота, мкг/м ³	суммарного выпадения азота, кг/га·год	выпадения аммония, кг/га·год
< 1,5	низкий	< 10	< 10	< 5
1,5 – 3,0	средний	10 – 25	10 – 15	5 – 10
> 3,0	высокий	> 25	> 15	> 10

2.2. Оценка биохимических и физиологических параметров лишайника *Parmelia sulcata*

Представлены общая характеристика индикаторного вида *P. sulcata* [Определитель..., 1971; Мучник и др., 2011; Wirth, Kirschbaum, 2014], ход сбора образцов и пробоподготовка к анализам [VDI, 2015] в лаборатории природных антиоксидантов Института живых систем БФУ им. И. Канта. Экстракция и расчет содержания фотосинтетических пигментов в талломе *P. sulcata*. (мг/г воздушно-сухого веса) производились по методике Барнеса [Barnes et al., 1992] спектрофотометрическим методом (спектрофотометр Shimadzu UV-3600).

Содержание общего фосфора в пробах *P. sulcata* определялось в сентябре – ноябре 2017 г. в минерализатах спектрофотометрически (спектрофотометр Юнико 1200) с использованием в качестве востановителя аскорбиновой кислотой [Воскресенская и др., 2006; Белюченко и др., 2012].

2.3. Определение химического состава коры деревьев

Пробы отбирались в 2016 г. в 10 городских квадратах (F-14, G-14, G-15, G-16, H-14, H-15, H-16, I-14, I-15, I-16) и на фоновых участках: Ф1 и Ф3 (рисунок 2). Всего было собрано 120 проб. Приготовление водной вытяжки коры деревьев осуществлялось согласно стандартным методикам [Иржигитова, Корчиков, 2011; Иржигитова и др., 2013]. Удельную электропроводность раствора (мкСм/см) и значение pH определяли в неотфильтрованных водных вытяжках (портативный кондуктометр-солемер НМ DIGITAL EC-3, pH-метр S50 SevenMulti Mettler Toledo). Определение нитратов, нитритов и аммония проводилось в отфильтрованных и обесцвеченных экстрактах [ГОСТ, 2015], с применением спектрофотометрического метода (Юнико 1200).

2.4. Статистическая обработка и визуализация пространственных данных

Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием программного обеспечения IBM SPSS Statistics Base и Microsoft Excel 2010. Визуализация пространственных данных осуществлена с использованием свободной кроссплатформенной геоинформационной системы Quantum GIS 2.18 и графического редактора Adobe Photoshop CS5.1.

Глава 3. Эколого-географические особенности лишенофлоры города Калининграда и фоновых территорий

На основе изучения видового разнообразия городских эпифитных лишайников, был составлен аннотированный список, насчитывающий 68 видов, относящихся к отделу *Ascomycota* [Lumbsch, Huhndorf, 2010; Lücking et al., 2016], подотделу *Pezizomycotina*, одному классу *Lecanoromycetes*, четырем подклассам, 7 порядкам, 13 семействам и 36 родам. Ведущую роль по числу видов занимает подкласс *Lecanoromycetidae* – 60 видов (рисунок 3а). Преобладают представители порядка *Lecanorales* – 39 видов и *Caliciales* – 16 видов (рисунок 3б).

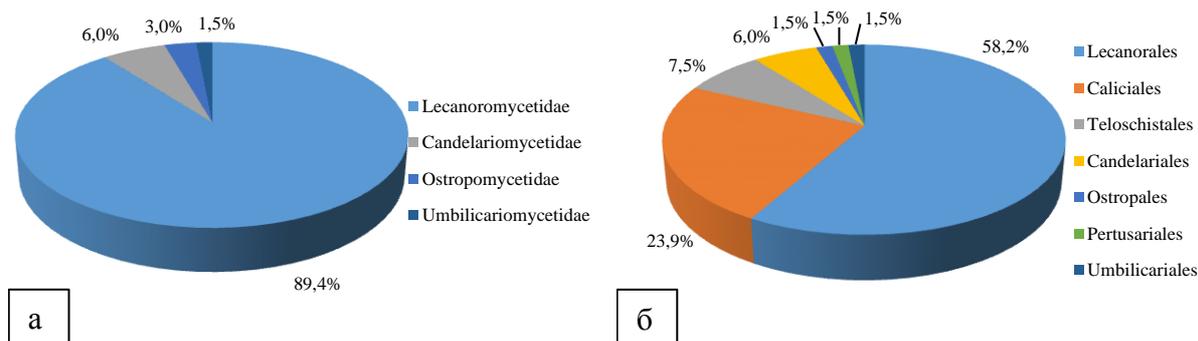


Рисунок 3 – Соотношение подклассов (а) и порядков (б) в лишенофлоре г. Калининграда

Среднее число видов на одно семейство составляет – 5,2. У четырех семейств видовое разнообразие выше среднего – *Parmeliaceae* (19 видов), *Physciaceae* (14), *Lecanoraceae* (10), *Ramalinaceae* (6). На их долю приходится 72 % всей городской эпифитной лишенобиоты (рисунок 4а). По результатам анализа жизненных форм (рисунок 4б), видно преобладание листоватых лишайников – 32 вида. Накипные лишайники также многочисленны – 27 видов, меньше всего кустистых форм (9 видов).

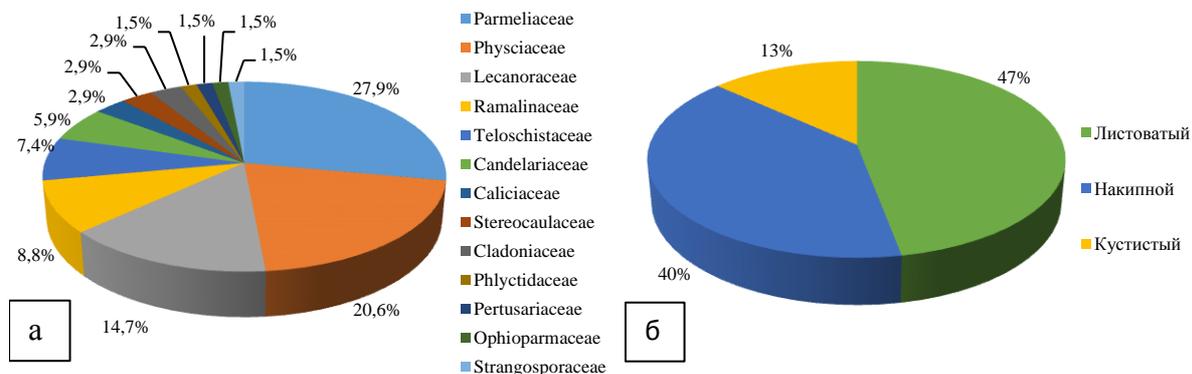


Рисунок 4 - Соотношение семейств (а) и жизненных форм лишайников (б) в лишенофлоре г. Калининграда

Во флоре городских лишайников выделено три географических элемента и пять типов ареала. Большинство видов (31 вид, 45,6 %) относятся к неморальному географическому элементу, с мультирегиональным типом ареала (21 вид). Около трети (24 вида, 35,3 %) бореальные, с преобладанием голарктического типа ареала (16 видов). В меньшей степени представлен мультизональный географический элемент (13 видов, 19,1 %), с доминированием мультирегионального типа (11 видов). Обнаружено три новых вида, которые рекомендуется включить в Красную книгу региона – *Punctelia jeckeri*, *Punctelia subrudecta* и *Xanthomendoza fulva*, вновь обнаружены местообитания листоватого лишайника *Flavoparmelia caperata*, считавшегося исчезнувшим [Красная книга ..., 2010].

Структура видового разнообразия лишайников отражает как географическое положение исследованной территории, с сохранением черт естественных лишенофлор, так и их антропогенную трансформацию в городских условиях с преобладанием листоватых, неморально-бореальных лишайников с мультирегиональными видами, обладающими низкой специфичностью.

Глава 4. Оценка воздействия загрязнения воздуха на лишайники

4.1. Воздействие на видовое разнообразие

Среди выявленных в городе 68 видов лишайников, 18 – индикаторы эвтрофикации (нитрофитные лишайники) [VDI, 2005; Wirth, 2010]. Среднее

число видов в квадратах учета колеблется от 9 (квадрат L-16) до 32 (D-11 и H-13). В условиях города по сравнению с фоновыми участками увеличивается доля видов-индикаторов эвтрофикации от общего числа видов в квадрате (рисунок 5а) и от среднего числа видов на одном форофите (рисунок 5б), снижаются значения по данным показателям для референтных лишайников.

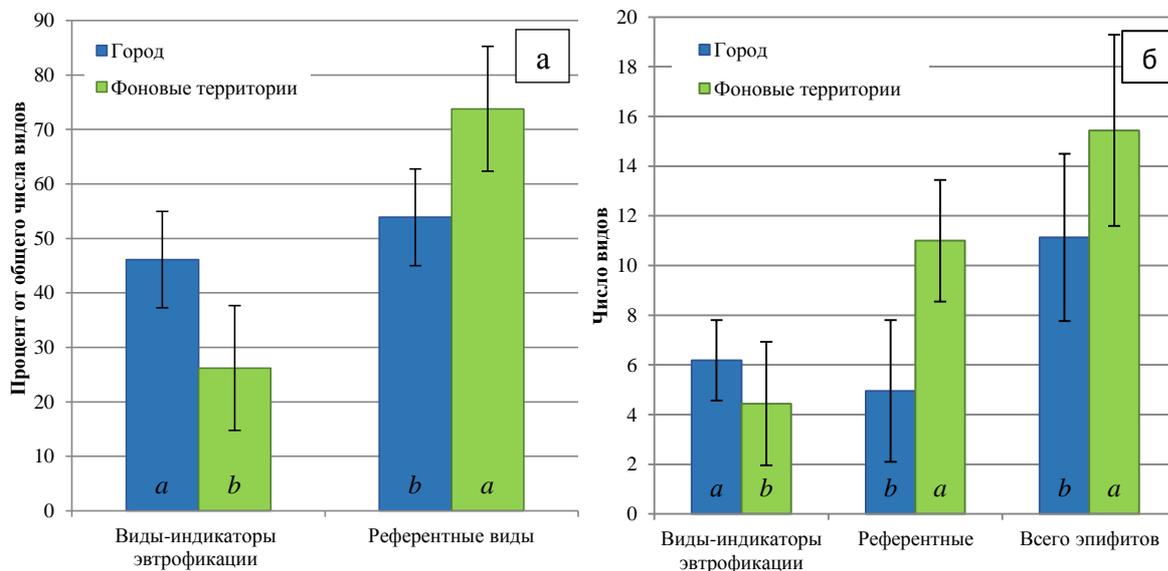


Рисунок 5 – Соотношение видов-индикаторов эвтрофикации и референтных видов (а) и среднее число индикаторных групп лишайников на одном дереве (б) в г. Калининграде и на фоновых участках (индексы *a* и *b* характеризуют достоверно различающиеся значения $p < 0,01$)

4.2. Результаты лишеноиндикационного картирования с применением индекса качества воздуха (LGI)

Картированием [VDI, 2005] выявлено, что на большей части г. Калининграда (62 %) – очень низкое качество воздуха. Площади с низким и средним качеством воздуха занимают соответственно 20 % и 13 % обследованной территории, наименьшую долю (5 %) – составляют парковые зоны с высоким качеством атмосферного воздуха (рисунок 6). Зон с очень высоким качеством воздуха не выявлено. На 95 % обследованной территории выявлено очень сильное влияние эвтрофицирующих соединений.

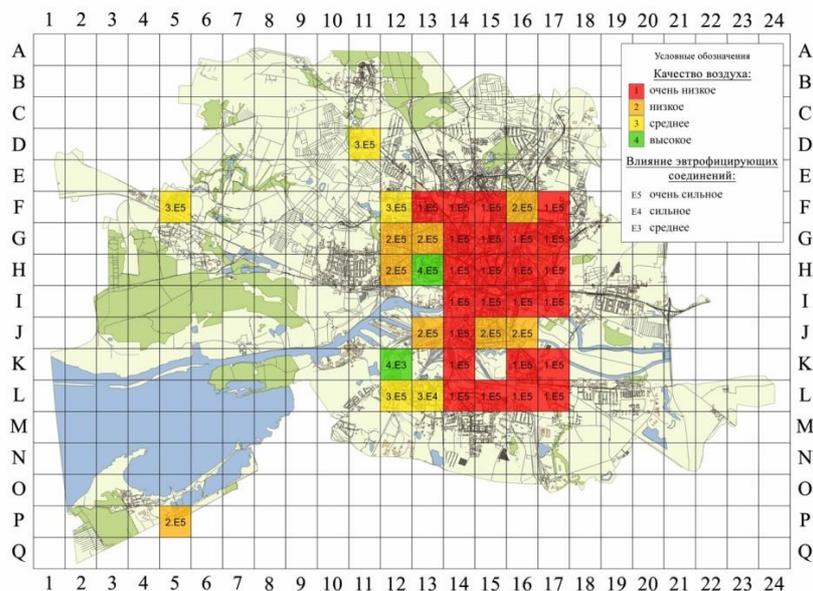


Рисунок 6 – Схема качества атмосферного воздуха и влияния эвтрофицирующих соединений в г. Калининграде

4.3. Изменение содержания фотосинтетических пигментов в талломе лишайника *Parmelia sulcata*

Анализ содержания основного фотосинтетического пигмента хлорофилла *a* в индикаторном лишайнике в зависимости от рассчитанного индекса (LGI) показал увеличение содержания пигмента с ухудшением качества воздуха: минимально его количество в окрестностях г. Светлогорска с очень высоким качеством воздуха в сочетании с очень низким воздействием эвтрофицирующих соединений (5.E1), а максимально на участках города с низким (2.E5) и очень низким (1.E5) качеством воздуха (рисунок 7а).

В то же время, отсутствуют достоверные различия по рассчитанному среднему коэффициенту феофитинизации – показателю деструкции хлорофилла (рисунок 7б). Полученные данные свидетельствуют об отсутствии заметного влияния кислотных поллютантов на фотосинтетическую систему лишайника.

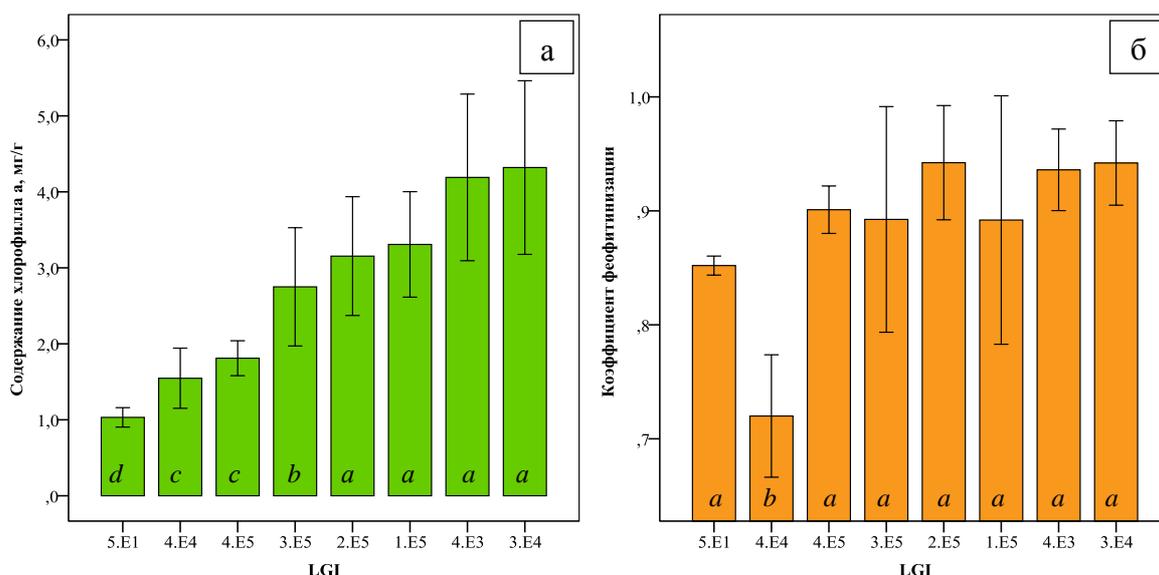


Рисунок 7 – Среднее содержание хлорофилла *a* (а) и средний коэффициент феофитинизации (б) в талломе *P. sulcata* на участках с разным индексом качества воздуха LGI (индексами *a*, *b*, *c*, *d* обозначены достоверно различающиеся значения $p < 0,05$)

4.4. Содержание азота, углерода и фосфора в талломе лишайника *Parmelia sulcata*

Выявлено увеличение содержания азота в талломе *P. sulcata* с ухудшением качества атмосферного воздуха (рисунок 8а). По содержанию углерода и фосфора различий выявлено не было.

Установлена сильная положительная корреляционная связь ($r_p = 0,841$; $p < 0,01$) между содержанием азота и хлорофилла *a* (рисунок 8б), что дает возможность использовать содержание основного фотосинтетического пигмента в качестве биоиндикационной тест-системы. Рассчитаны контрольные значения содержания хлорофилла *a* согласно уровню азота в методике VDI 3957 Blatt 18. Так, «низкому» уровню загрязнения эвтрофицирующими веществами отвечает среднее содержание хлорофилла *a* меньше 2,1 мг/г; «среднему» – содержание пигмента от 2,1 до 3,9 мг/г; «высокому» – более 3,9 мг/г.

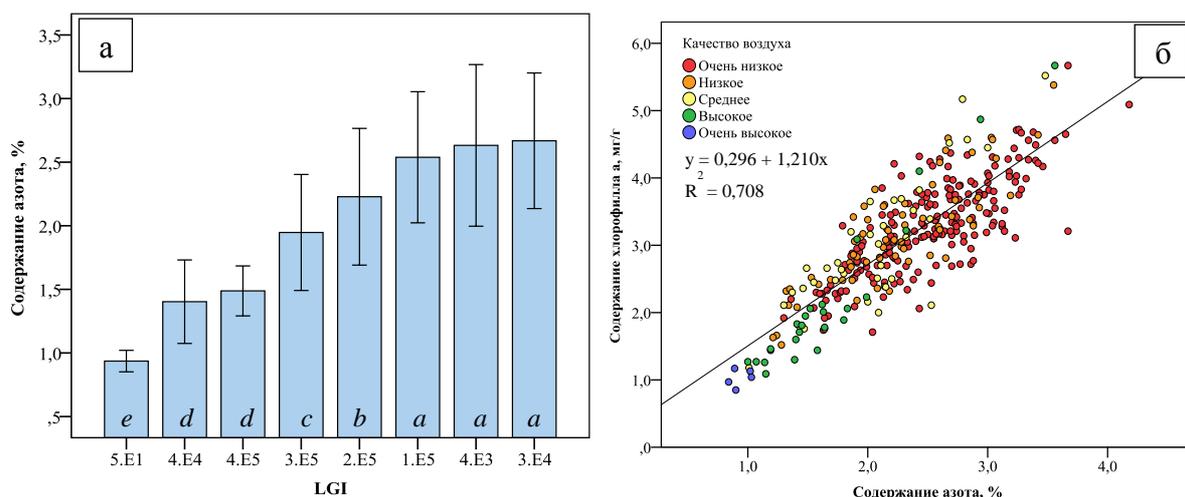


Рисунок 8 – Среднее содержание азота в талломе *P. sulcata* на участках с разным индексом качества воздуха LGI (а) и диаграмма рассеивания зависимости содержания хлорофилла *a* от процентного содержания азота в *P. sulcata* (б) (индексами *a*, *b*, *c*, *d* и *e* обозначены достоверно различающиеся значения < 0,05)

4.5. Оценка загрязнения атмосферного воздуха эвтрофицирующими веществами

По среднему содержанию азота в талломах *P. sulcata*, выявлено, что большая часть городской территории – 90%, характеризуется средним уровнем загрязнения эвтрофицирующими веществами. На участки с низким и высоким уровнем загрязнения приходится по 5% (рисунок 9а).

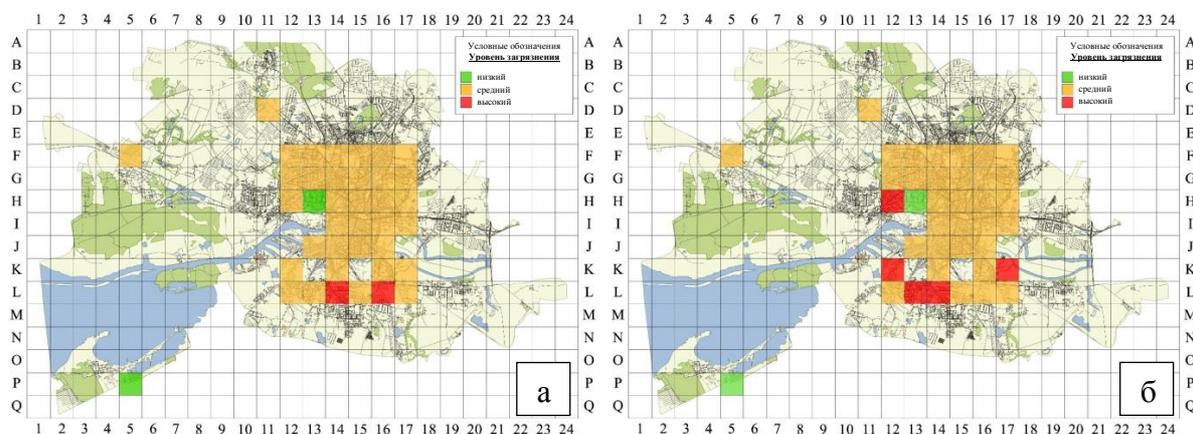


Рисунок 9 – Схема загрязнения атмосферного воздуха г. Калининграда эвтрофицирующими соединениями по содержанию азота (а) и по содержанию хлорофилла *a* (б) в талломе *P. sulcata*

На основании рассчитанных контрольных значений содержания хлорофилла *a* в *P. sulcata* показано, что большая часть городской территории (82%) характеризуется средним уровнем загрязнения эвтрофицирующими веществами. Значительно меньше площадь с низким (5%) и высоким (13%) уровнем загрязнения (рисунок 9б). По содержанию хлорофилла *a* в талломе *Parmelia sulcata* получены сопоставимые результаты с методикой VDI 3957 Blatt 18 [VDI, 2015].

4.6. Изменения химического состава коры деревьев

В центральной части г. Калининграда выявлен видоспецифичный характер химического состава коры деревьев-форофитов. В то же время не было выявлено существенных изменений свойств коры на участках с разным уровнем качества воздуха. Установлено снижение кислотности коры ясеня обыкновенного в условиях очень низкого качества воздуха. В дальнейшем использование древесной коры как тест-системы не перспективно, интерпретация данных и дифференцировка территории по уровню загрязнения затруднена.

4.7. Геоэкологический статус функциональных зон города Калининграда

Достоверно низкое содержание хлорофилла *a* и азота в талломе *P. sulcata* выявлено в лесопарковой зоне (рисунок 10), максимально оно в жилой, производственной и в зоне улично-дорожной сети. Геоэкологический статус городских функциональных зон, определенный согласно методике VDI 3957 Blatt 18, характеризуется средним уровнем загрязнения эвтрофицирующими соединениями; по результатам оценки содержания хлорофилла *a* в городских парках выявлен низкий уровень загрязнения, во всех остальных зонах уровень загрязнения – средний.

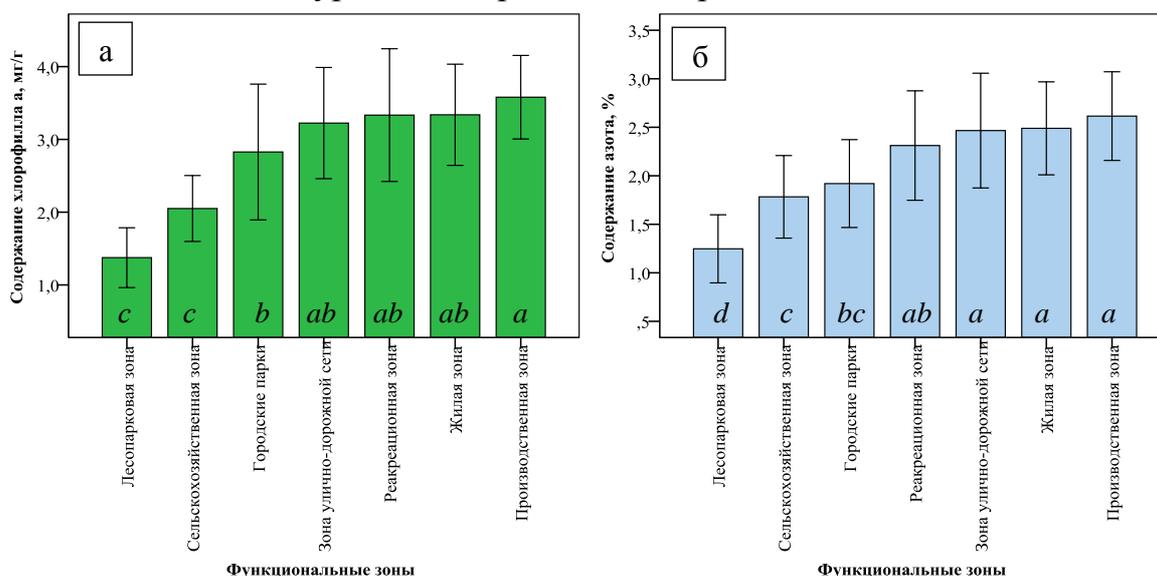


Рисунок 10 – Содержание хлорофилла *a* (а) и азота (б) в талломах лишайника *Parmelia sulcata* в функциональных зонах г. Калининграда и на фоновых территориях (индексами *a*, *b*, *c* и *d* обозначены достоверно различающиеся значения $< 0,05$)

Анализ воздействия автотранспортной нагрузки выявил тенденцию повышения содержания в талломах *P. sulcata* хлорофилла *a* и азота (рисунок 11). Наименьшее среднее число референтных видов лишайников обнаружено в условиях высокой ($3,8 \pm 1,9$) и умеренной ($5,1 \pm 1,9$) автотранспортной нагрузки, а также вблизи парковок ($4,6 \pm 3,1$). В условиях низкой нагрузки

($6,0 \pm 3,5$) и фонового загрязнения ($7,9 \pm 3,3$) выявлено максимальное среднее число референтных видов.

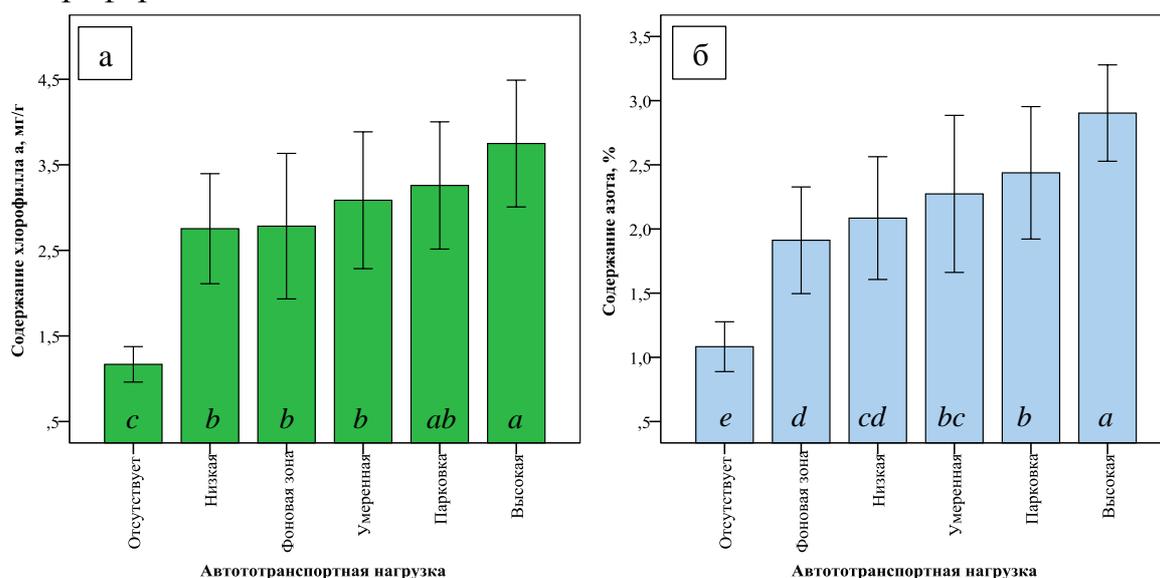


Рисунок 11 – Содержание хлорофилла *a* (а) и азота (б) в талломах лишайника *Parmelia sulcata* в зависимости от уровня автотранспортной нагрузки (индексами *a, b, c, d* и *e* обозначены достоверно различающиеся значения $< 0,05$)

При оценке воздействия автотранспортной нагрузки на физиолого-биохимические параметры *P. sulcata* в функциональных зонах города и на фоновых участках, установлены существенные различия по уровням содержания азота и хлорофилла *a*. Например, в жилой зоне вблизи парковок содержание азота достоверно выше ($2,51 \pm 0,48$ %) по сравнению с фоновой зоной ($1,95 \pm 0,04$ %); в рекреационной зоне на участках с высоким уровнем автотранспортной нагрузки достоверно выше ($p < 0,05$) содержание азота и хлорофилла *a* ($2,81 \pm 0,38$ %; $4,10 \pm 0,78$ мг/г) по сравнению с парковкой ($1,97 \pm 0,35$ %; $2,88 \pm 0,38$ мг/г) и фоновой зоной ($1,85 \pm 0,29$ %; $2,54 \pm 0,44$ мг/г); в лесопарковой зоне г. Зеленоградска, вблизи мест организованной парковки, достоверно больше ($p < 0,05$) содержания хлорофилла *a* ($1,79 \pm 0,41$ мг/г) и азота ($1,58 \pm 0,38$ %), по сравнению с отсутствием воздействия автотранспорта ($1,08 \pm 0,19$ %; $1,17 \pm 0,21$ мг/г).

Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии выбросов автотранспорта на физиолого-биохимические показатели и видовое разнообразие лишайников, что также определяет геоэкологический статус функциональных зон города и согласуется с официальными данными [Государственный доклад ..., 2017].

Выводы

1. В составе современной лишайнофлоры города Калининграда насчитывается 68 эпифитных видов, систематическая структура которых

отражает как географическое положение территории, с сохранением черт естественных лишенофлор, так и свидетельствует об антропогенной трансформации: в городских условиях преобладают листоватые, неморально-бореальные лишайники с участием мультирегиональных видов, обладающие низкой специфичностью.

2. В городской лишенофлоре преобладают виды лишайников, относящиеся к неморальному географическому элементу (31 вид, 45,6 %), в меньшей степени представлены бореальный (24 вида, 35,3 %) и мультизональный (13 видов, 19,1 %) элементы. На фоновых территориях наблюдается доминирование лишайников неморальной флоры (24 вида, 55,9 %).

3. В Калининграде и на фоновых территориях впервые обнаружены три новых для региона вида лишайников – *Punctelia jeckeri*, *Punctelia subrudecta* и *Xanthomendoza fulva*, выявлены местообитания листоватого лишайника *Flavoparmelia caperata*, считавшегося исчезнувшим.

4. По результатам лишеноиндикационного картирования с применением методики VDI 3957 Blatt 13 было установлено, что большая часть г. Калининграда – 62 % имеет очень низкое качество воздуха, квадраты с низким и средним качеством воздуха занимают соответственно 20 % и 13 % обследованной территории, наименьшую долю (5 %) составляют зоны с высоким качеством атмосферного воздуха, покрывающие территории городских парков.

5. Оценка загрязнения атмосферного воздуха эвтрофицирующими веществами, согласно методике VDI 3957 Blatt 18, показала, что большая часть городской территории (90 %) характеризуется средним уровнем загрязнения эвтрофицирующими веществами, квадраты с низким и высоким уровнем загрязнения занимают 5 %. На основании рассчитанных контрольных значений содержания хлорофилла *a* в *Parmelia sulcata* показано, что большая часть городской территории (82 %) имеет средний уровень загрязнения эвтрофицирующими веществами, два квадрата имеют низкий уровень загрязнения и в пяти квадратах (13 %) оценен как «высокий».

6. Анализ химических свойств коры деревьев-форофитов центральной части города Калининграда выявил видоспецифичный характер химического состава: кислотности и удельной электропроводности, содержания аммония, нитрата и суммарной массовой концентрации азотсодержащих веществ. Установлено снижение кислотности коры ясеня обыкновенного в условиях очень низкого качества воздуха.

7. Геоэкологический статус функциональных зон Калининграда, согласно методике VDI 3957 Blatt 18, характеризуется средним уровнем загрязнения эвтрофицирующими соединениями; согласно результатам оценки загрязнения по содержанию хлорофилла *a* в талломе *Parmelia sulcata* – городские парки имеют низкий уровень загрязнения, во всех остальных зонах уровень загрязнения определен как «средний».

Практические рекомендации

Для улучшения геоэкологической обстановки в Калининграде необходимо реализовать целый комплекс мер, относящихся к модернизации транспортной сети, озеленению городских территорий, запрету парковок автомобилей на придомовых территориях, организации муниципальных паркингов и др.

Для дальнейших биоиндикационных исследований предлагается методика оценки загрязнения атмосферного воздуха эвтрофицирующими веществами, с использованием в качестве тест-системы содержание хлорофилла *a* в талломе *Parmelia sulcata*.

В новое издание Красной книги Калининградской области следует включить три вида лишайников *Punctelia jeckeri*, *Punctelia subrudecta* и *Flavoparmelia caperata* с охранным статусом «редкий» и вид *Xanthomendoza fulva* – «неопределенный по статусу».

Полученные результаты лишеноиндикационного картирования могут быть положены в основу разработки программ долговременного геоэкологического мониторинга и оценок качества атмосферного воздуха в городах Калининградской области. Результаты могут быть использованы Министерством природных ресурсов и экологии Калининградской области при подготовке ежегодных государственных докладов об экологической обстановке в регионе.

Публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Пунгин А.В.**, Петренко Д.Е. К вопросу об изучении лишенофлоры Калининграда // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта 2013. – Вып. 7. – С. 103-109.

2. **Пунгин А.В.**, Дедков В.П., Петренко Д.Е., Фещенко Ю.В., Яковлева С.А., Чапилкин В.В. Лишенофлора Ботанического сада Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта 2015. – Вып. 1. – С. 78-86.

3. **Пунгин А.В.**, Чайка К.В., Гришанов Г.В., Петренко Д.Е., Королев К.С. Лишайники черноольхового леса, находящегося под воздействием гнездовой колонии большого баклана (Куршский залив, Калининградская область) // Ботанический журнал. – 2015. – Т. 100. – № 11. – С. 1154-1161.

4. **Пунгин А.В.**, Чайка К.В., Федурев П.В., Парфенова Д.А. Геоэкологическая оценка состояния атмосферного воздуха города Калининграда с применением метода лишеноиндикационного картирования // Успехи современного естествознания. 2018. – № 8. – С. 178-184.

Публикации, учитываемые в базах цитирования Scopus и Web of Science

5. Windisch U., **Pungin A.**, Meckel T. Wirkungen von Verkehrsbelastungen auf die Flechtendiversität sowie den Stickstoff- und Chlorophyllgehalt von *Parmelia sulcata* in Hessen // Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft. – 2016. – V. 76. – Nr. 4, – S. 128-135.

6. **Pungin A.** and Dedkov V. Assessment of air quality by lichen indication method in the central part of Kaliningrad // Research Journal of Chemistry and Environment. – 2017. – Vol. 21 (2). – P. 32-39.

7. **Pungin A.**, Windisch U., Skrypnik L., Chaika C., Feduraev P. Biomonitoring von Eutrophierungswirkungen in Kaliningrad (Russland) mit Flechten und Baumrinden // Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft. – 2017. – V. 77. – Nr. 4, – S. 137-142.

8. Мейсурова А.Ф., Нотов А.А., **Пунгин А.В.** Фотосинтетические пигменты в образцах лишайника *Hypogymnia physodes* при разном уровне содержания металлов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2017. – Т. 84, – № 6. – С. 963-968. (Meysurova A.F., Notov A.A., **Pungin A.V.** Photosynthetic pigments in *Hypogymnia physodes* with content of metal in different level // Journal of applied spectroscopy. – 2017. – V. 84, – N 6, – P. 1037-1043)

9. **Pungin A.**, Chaika Ch., Windisch U., Skrypnik L. Ornithogenic effects on the lichen biota of the Black Alder forest generated by the Great Cormorant nesting colony // Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft. – 2018. – V. 78. – Nr. 4. – S. 160-165.

Статьи в других изданиях

10. **Пунгин А.В.** К вопросу об исследовании флоры лишайников Калининграда // Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2014» (Москва, Россия, 7 — 11 апреля 2014) – Москва: Издательство Московского университета, – 2014. – С. 182-183.

11. **Пунгин А.В.,** Парфёнова Д.А. Видовое разнообразие эпифитных лишайников города Калининграда // Биоразнообразие: подходы к изучению и сохранению: материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию кафедры ботаники Тверского государственного университета (г. Тверь, 8–11 ноября 2017 г.). – Тверь: Твер. гос. ун-т, – 2017. – С. 334-339.

12. **Pungin A.V.,** Parfenova D.A. Bioindicative role of *Parmelia sulcata* Taylor photosynthetic pigments in conditions of reactive nitrogen atmospheric pollution // Proceedings of IV (XII) International Botanical Conference of Young Scientists in Saint-Petersburg, April 22-28, 2018. Saint-Petersburg, Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences. – 2018. – P. 134.

Пунгин Артём Викторович

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО
ВОЗДУХА ГОРОДА КАЛИНИНГРАДА МЕТОДОМ
ЛИХЕНОИНДИКАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Отпечатано с готового оригинал-макета
Подписано в печать __.__.2018 г. Формат 60x84 1/16.
Усл.печ.л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ ____.

Типография издательства БФУ им. И. Канта
Калининград, ул. Гайдара, д.6
Тел. 8(4012)595595