

На правах рукописи

МИННУЛЛИНА Гульназ Раисовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЛИХЕНОИНДИКАЦИИ ДЛЯ
ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА
УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ**

Специальность 03.00.16 – “Экология”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

2006 г.

Работа выполнена в Уфимском государственном авиационном техническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Красногорская Наталия Николаевна

Научный консультант: кандидат биологических наук, доцент
Журавлёва Светлана Евгеньевна

Официальные оппоненты: доктор биологических наук,
Нифонтова Майя Гедадьевна

кандидат биологических наук, доцент
Федоров Николай Иванович

Ведущая организация: Марийский государственный университет

Защита состоится «20» декабря 2006 года в 14.00 на заседании
Диссертационного совета КМ 002.136.01 в Институте биологии УНЦ РАН по
адресу: 450054, РБ, г. Уфа, пр. Октября 69

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института биологии УНЦ
РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2006 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Уразгильдин Р.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Важнейшей задачей современной системы мониторинга окружающей среды является разработка методов, позволяющих оценить соответствие качества среды условиям, необходимым для нормальной жизнедеятельности живых организмов (Проблемы загрязнения ..., 1993; Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С., 2000). Перспективным направлением для решения данной задачи является применение биологических методов, основанных на использовании показателей чувствительных к состоянию окружающей среды организмов – биоиндикаторов (Р. Шуберт, 1988; Биоиндикация., 1991; Mulgrew A., Williams P., 2000; Лобанов А.В., Шувалова Ю.В., Зырина А.Е. и др., 2001; Scheidegger C. *et al.*, 2002; Zechmeister H.G., Hohenwallner D. A., 2006; и др.).

Наибольшее признание в оценке качества воздушного бассейна с помощью биоиндикаторов нашли методы лишеноиндикации: благодаря своим физиологическим особенностям лишайники способны адекватно реагировать на изменение качества окружающей среды (Трасс Х.Х., 1987; Бязров Л.Г., 1992, 1998, 2002; Pirintsos S.A., Loppi S., 2003; Loppi S. *et al.*, 2004; Gombert S. *et al.*, 2004; и др.).

Использованию показателей биоразнообразия лишайников (количество видов, обилие, встречаемость) для оценки качества атмосферного воздуха посвящены многие исследования (Dietrich M., Scheidegger C., 1997; Jonsson B.G., Jonsell M., 1999; Бязров Л.Г. 2002; Carvalho P. *et al.*, 2002; Hauck M. *et al.*, 2002; Gombert S. *et al.*, 2004; и др.). Тем не менее в применении данных показателей для оценки качества воздушного бассейна урбанизированных территорий остаются малоизученные вопросы. Они связаны, как правило, с наличием дополнительных экологических факторов, влияющих на возможность произрастания лишайников, и неоднородности данных факторов в условиях города, что затрудняет использование видового состава лишайников для определения точных зональных распределений загрязнения на территории города (Van Dobben H.F., Ter-Braak J. F., 1999; Удянская Е.А., 2001; Brunialti and Giordani, 2003).

В этой связи особое значение приобретают исследования по совершенствованию существующих методов лишеноиндикации путём более детального исследования возможности использования традиционных подходов, основанных на показателях видового состава, и перехода к альтернативным методам, основанным на показателях организменного уровня лишайников. Так, морфологические изменения талломов являются первыми визуально различимыми признаками, которые свидетельствуют о воздействии на лишайники загрязняющих веществ и сигнализируют об этом задолго до существенных изменений в видовом составе (Lawrey J.D., Hale M.E., 1977; Scott M.G., Hutchinson T.C., 1989, 1990; Отнюкова Т.Н., 1997, 1998). Несмотря на то, что решающее влияние на морфологию лишайников оказывает газовый состав воздуха, морфологические показатели не нашли широкого применения для оценки качества воздуха. Это обусловлено тем, что существующие методики оценки состояния талломов носят визуальный, субъективный характер, что снижает надежность получаемых оценок и ограничивает возможность их использования в целях биомониторинга. Успешное развитие данных методов в направлении разработки объективных количественных показателей талломов

лишайников открывает новые возможности в использовании лишайников для оценки качества атмосферного воздуха урбанизированных территорий.

Цели и задачи работы Целью работы является совершенствование методов лишеноиндикации для оценки качества атмосферного воздуха урбанизированной территории.

Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

- изучить общее состояние лишенобиоты г.Уфы, выявить и проанализировать процессы и показатели, которые отображают изменения, происходящие в лишайниковых сообществах в условиях урбанизированной территории;
- выявить границы применимости метода, основанного на оценке видового состава лишайников, при оценке качества воздуха урбанизированной территории;
- разработать методические подходы оценки качества воздуха по показателям, основанным на морфологическом состоянии талломов лишайников;
- исследовать возможность использования показателя состояния талломов лишайников для диагностики состояния лишайниковых сообществ в условиях урбанизированной территории.

Научная новизна

Впервые для района исследования выявлен видовой состав и структура лишайников, дана подробная характеристика состояния лишенобиоты.

На основе применения математических подходов к оценке талломов предложен количественный показатель состояния талломов – индекс структуры ($I_{стр}$). Выведена математическая зависимость, описывающая изменение индекса структуры ($I_{стр}$) лишайника при изменении величины загрязняющих веществ в атмосфере, на основании чего разработан новый способ оценки качества атмосферного воздуха (Патент РФ 2260934 С1).

Показана связь между изменениями, происходящими на организменном и биоценоотическом уровнях организации лишайников в условиях атмосферного загрязнения. Предложена методика использования количественного показателя состояния талломов лишайников для оценки состояния лишайниковых сообществ в условиях урбанизированной территории.

Практическая ценность работы

Созданные в ходе работы коллекция лишайников и база данных по лишенологическим показателям различных районов г.Уфы переданы в Институт Биологии УНЦ РАН. Полученные данные могут служить основой при разработке программ долговременного мониторинга качества атмосферного воздуха г.Уфы.

Разработана методика оценки степени загрязнения атмосферного воздуха, основанная на использовании количественного показателя состояния талломов лишайников $I_{стр}$. Показана возможность использования показателя $I_{стр}$ для оценки нарушенности лишайниковых сообществ в условиях урбанизированной территории.

Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в учебный процесс Уфимского государственного авиационного технического университета и используются при подготовке специалистов по направлению бакалаврской и магистерской подготовки 280200 “Защита окружающей среды” и по специальности 280100 “Безопасность жизнедеятельности в техносфере”.

На защиту выносятся:

- информативность показателей видового состава лишайников для оценки качества воздуха урбанизированных территорий;
- математическая зависимость показателя состояния талломов лишайников от степени атмосферного загрязнения и способ оценки качества атмосферного воздуха урбанизированных территорий на основе количественного показателя состояния талломов лишайников;
- результаты исследования взаимосвязи между изменениями на организменном и биоценоотическом уровнях организации лишайников в условиях атмосферного загрязнения.

Апробация работы Основные положения диссертации доложены и обсуждены на 15 международных и региональных научных конференциях в городах: Москва (2000, 2001, 2004); Новосибирск (2001, 2003, 2004); Уфа (2002-2005); Самара (2001); Томск (2003, 2004); Моршанск (2004); Гераклион, Греция (2004); Бирмингем, Великобритания (2006).

Публикации По теме диссертации опубликовано 24 печатные работы, в том числе 8 статей. Получен патент на способ оценки качества атмосферного воздуха с помощью лишайников.

Структура и объем диссертации Работа изложена на 180 страницах машинописного текста, включая 48 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 138 наименований, в том числе 88 иностранных источников. Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов, списка литературы и приложения.

Исследования поддержаны Федеральной целевой программой «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 2001-2004 годы» (контракт № И 0439/678).

Глава 1. Использование лишайников для оценки качества атмосферного воздуха

Рассмотрены основные физиологические особенности лишайников, объясняющие их чувствительность к качеству окружающей среды (Hawksworth D.L., 1971; Nash T.H., 1973; Солдатенкова Ю.П., 1977; Артамонов В.М., 1989; Шапиро И.А., 1996). Проанализированы существующие подходы к использованию лишайников для оценки качества атмосферного воздуха с обзором показателей, на основе которых проводится биоиндикация (Hawksworth D.L., Rose F., 1970; LeBlanc Fabius, Rao D.N., 1975; Трасс Х.Х., 1987; Михайлова И.Н., Воробейчик Е.Л., 1995; Бязров Л.Г., 1991, 1998; Малышева Н.В., 1996; Родникова И.М., Скирина И.Ф., Христофорова Н.К., 1998; Байбаков Э.И., 2000 и др.). Дан обзор основных работ по использованию лишайниковых методов в условиях урбанизированных территорий (LeBlanc, Fabius, Rao D.N., 1970, 1973; Brodo I. M., 1972; Голубкова Н.С., Малышева Н.В., 1978; Бязров Л.Г., 1998; Байбаков Э.И., Ситников А.П., 2000 и др.). Выявлено, что в условиях города применение показателей видового состава для оценки качества воздуха затрудняется наличием неоднородности комплекса факторов, определяющих возможность произрастания лишайников различных видов. Показано, что совершенствование методов лишайниковой индикации качества воздуха в условиях урбанизированной

территории требует установления границ информативного применения методов, основанных на показателях видового состава лишайников, и перехода к методам, основанным на показателях состояния талломов лишайников.

Глава 2. Общая характеристика объекта исследования

В главе дана краткая физико-географическая характеристика г.Уфы. Приведены сведения об особенностях атмосферного загрязнения города. Выявлено преобладание в воздухе загрязнителей, характеризующихся токсическим действием на лишайники, в результате подтверждена актуальность использования лишайников в качестве биоиндикаторов.

Глава 3. Материалы и методы исследования

Для выявления видового состава и анализа состояния лишенобиоты урбанизированной территории города Уфы использованы стандартные методики. На основе анализа расположения основных источников загрязнения атмосферы, автоматизированных станций по контролю качества воздуха и наличия местообитаний, необходимых для произрастания эпифитов, выбраны районы сбора лишайников, включающие в себя, как правило, крупные зелёные массивы (парки), лесные зоны, аллеи и посадки.

Описания лишайниковых группировок проводились на стволах деревьев со всех экспозиций, площадью размером от 20 до 100 см², в пределах однородной растительности, в соответствии с общими установкам направления Браун-Бланке (Braun-Blanquet, 1964; Westhoff, Maarel, 1978; Миркин, Наумова, 1998; Миркин и др., 2000). При выполнении описаний использовалась шкала Ж. Браун-Бланке (Braun-Blanquet, 1964): г- вид встречается единично; + - вид встречается чаще, но его проективное покрытие не превышает 1%; 1 - число особей велико, проективное покрытие от 1 до 5%; 2 - проективное покрытие от 6 до 25 %; 3 - проективное покрытие от 26 до 50 %; 4 - проективное покрытие от 51 до 75 %; 5 - проективное покрытие выше 75 %. Постоянство видов в фитоценозах оценивалось по следующей шкале: + - 1-10%; I-11-20%; II-21-40%; III-41-60%; IV-61-80%; V-81-100%. Видовые названия всех лишайников выверены в соответствии со сводкой Р. Сантенссон (Santensson *et al.*, 2004). Всего проведено 115 описаний лишайниковых группировок. Идентификация лишайников проводилась в лаборатории геоботаники и растительных ресурсов Института Биологии Уфимского научного центра РАН. Для обработки данных использовались компьютерные программы «TURBOVEG» и «MEGATAB».

Сбор образцов лишайников для изучения морфологических изменений талломов в результате атмосферного загрязнения проводился в лесонасаждениях, находящихся вблизи автоматизированных станций Башгидрометцентра по контролю качества воздуха, и в фоновой территории (санаторий Юматово). Методика отбора образцов и оценки качества атмосферного воздуха на основе показателя состояния талломов лишайников разрабатывались в ходе настоящей работы. Всего для исследования собрано более 600 образцов талломов лишайников *Physcia stellaris* и *Parmelia sulcata*. Для получения изображений талломов исполь-

зовался проекционный сканер ScanNex II. Обработка изображения проводилась с помощью программ Picture Publishing, Graphic Workshop 6.1; индекс структуры талломов рассчитывался с помощью программы расчета фрактальной размерности (Цвиленева Н.Ю., 1998). Зависимость индекса структуры талломов от индекса загрязнения атмосферы проверялась с использованием коэффициента регрессии. Достоверность всех данных оценивалась при уровне значимости 0,05 и меньше. Статистическая обработка материала проводилась с применением Excel.

Глава 4. Изучение общего состояния лишенобиоты урбанизированной территории города Уфы

В результате анализа данных 115 геоботанических описаний установлено, что видовой состав лишайников г. Уфы представлен 52 видами. Анализ структуры лишенобиоты г.Уфы, проведенный на основе распределения выявленных видов лишайников по семействам и жизненным формам, выявил доминирование семейств *Physciaceae* и *Parmeliaceae* (рис. 1) и преобладание листовато-накипных и накипных видов (рис. 2).

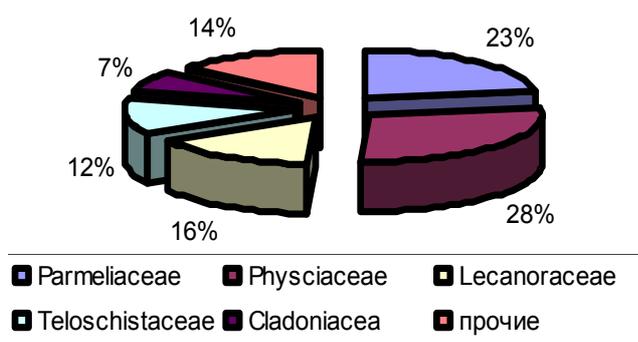


Рис. 1. Доля семейств в лишенобиоте г.Уфы



Рис. 2. Спектр жизненных форм лишайников г.Уфы

Проведено сравнение структуры лишенобиоты г. Уфы с данными по видовому составу лишайников естественной территории заповедника Шульган-Таш (рис. 3 и 4). Отмечены основные изменения, произошедшие в лишайниковых сообществах в результате антропогенного воздействия.

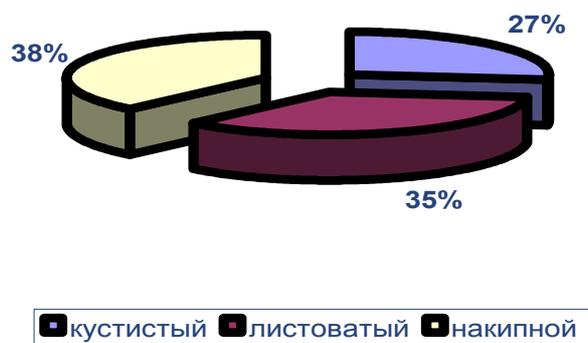


Рис. 3. Спектр жизненных форм лишайников Шульган-Таш

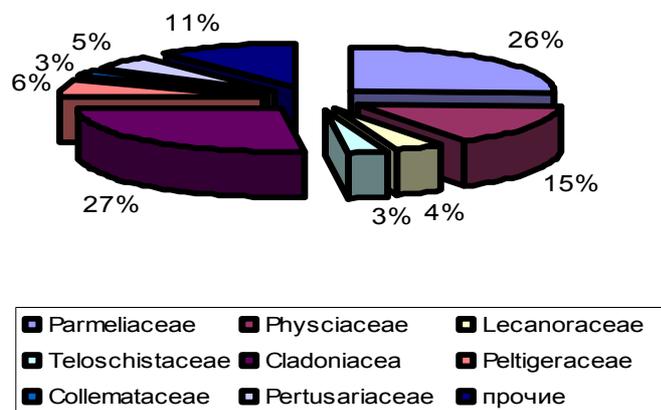


Рис. 4. Доля семейств в лишенобиоте заповедника Шульган-Таш

Так, при проведении лихенологического исследования на естественной территории заповедника Шульган-Таш обнаружено более 290 видов лишайников. По количеству видов лишайников на ненарушенной территории доминируют виды семейства *Cladoniaceae*, *Parmeliaceae* и *Physciaceae* (рис. 4). В условиях урбанизированной территории преобладают лишайники семейства *Physciaceae*, затем следуют семейства *Parmeliaceae*, *Lecanoraceae* и *Teloschistaceae* (рис. 1). На территории заповедника спектр жизненных форм лишайников представлен в основном кустистыми и листоватыми видами - 2/3 части всей лишайнобиоты (рис. 3). Полученные показатели в очередной раз свидетельствуют о существенных изменениях, происходящих в лишайниковых сообществах в условиях нарушенных экосистем.

В г.Уфе наблюдается наличие характерного для многих городов процесса формирования синантропной лишайнобиоты, представленной в основном видами: *Physcia dubia*, *P. stellaris*, *P. tribacia*, *Scoliciosporum chlorococum*, *Xanthoria parietina*, *Caloplaca sp.*, *Lecanora sp.* Выявленные в работе закономерности в структуре лишайникового покрова г. Уфы согласуются с данными по другим урбанизированным территориям (Малышева Н.В., 1996; Байбаков Э.И., 2001).

Глава 5. Изучение информативности показателей видового состава для оценки качества атмосферного воздуха урбанизированной территории

В работе проанализирована возможность использования показателей видового состава лишайников для целей временного и пространственного мониторинга качества воздуха урбанизированной территории.

Показано, что данные по видовому составу лишайников, произрастающих в различных районах города, представляют большой практический интерес с точки зрения долговременного мониторинга: на основании повторного изучения лишайников установленных пробных площадок представляется возможным отслеживать динамику состояния атмосферы в различных районах города и оценивать эффективность проводимых природоохранных мероприятий. Временной интервал такого мониторинга в зависимости от целей исследования может варьировать от нескольких лет до нескольких десятков лет (Бязров Л.Г., 1991; Байбаков Э.И., Ситников А.П., 2000). Привлекательность данного подхода заключается не только в получении интегрального эффекта долговременного влияния загрязнения, но в повышении вероятности того, что изменение в видовом составе обусловлены только изменением качества атмосферного воздуха, что может быть достигнуто соблюдением постоянства пробных площадок.

В работе предложены 3 основных подхода долговременного мониторинга качества атмосферного воздуха на основе выявления и оценки нового состояния видового состава лишайников. Данные подходы выражены через зависимости:

$$1) Y = f(N) \qquad 2) Y = f(N, S) \qquad 3) Y = f(N, S, A)$$

где, Y - индекс качества атмосферного воздуха на основе биоразнообразия лишайников исследуемой территории; N – количество видов лишайников; S – чувствительность видов к атмосферному загрязнению; A – обилие различных видов.

Отмечено, что наиболее точную оценку дает подход, принимающий во внимание кроме видового состава также чувствительность и обилие видов. Как было показано в ряде работ (Трасс Х.Х. и др., 1987), на начальных стадиях загрязнения некоторые поллютанты вызывают эвтрофикацию среды, что стимулирует некоторое обогащение лишайникового покрова. В этом случае учёт чувствительности и обилия лишайников позволит уменьшить вклад в значение вычисляемого индекса Y фактора, связанного с увеличением количества синантропных видов в условиях повышения степени загрязнения.

В результате проведенного в работе сравнительного анализа классов чувствительности лишайников, установленных для г.Уфы, с данными по другим урбанизированным территориям (Барнаул, Стокгольм) наблюдается существенное различие в чувствительности одних и тех же видов, произрастающих в условиях различных регионов. В связи с этим отмечена необходимость предварительных исследований по установлению чувствительности лишайников для каждой конкретно исследуемой территории до проведения биоиндикационных программ.

Для изучения возможности использования данных по видовому составу лишайников в целях пространственной дифференциации районов города по качеству атмосферного воздуха проведен анализ распространения лишайниковых группировок. В таблице 1 приведены основные лишайниковые группировки, выявленные для территории г.Уфы.

Таблица 1. Эпифитные лишайниковые группировки Уфы

Номер группировки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число описаний	5	9	12	5	8	7	11	12	12
Число видов	1	4	8	8	8	10	16	20	20
Зоны	1		2	3			4		
<i>Physcia dubia</i>	V	IV	V	II	V	V	IV	V	IV
<i>Physcia stellaris</i>	.	V	V	V	IV	V	II	III	III
<i>Scoliciosporum chlorococum</i>	.	.	IV	II	III	III	I	III	III
<i>Parmelia sulcata</i>	.	.	IV	I	II	.	II	I	II
<i>Xanthoria parietina</i>	.	.	.	V	IV	.	II	I	+
<i>Physconia perisidiosa</i>	.	.	.	.	.	V	.	+	.
<i>Phaeophyscia nigricans</i>	.	.	.	.	.	I	V	II	.
<i>Xanthoria fallax</i>	.	.	.	.	.	.	.	V	.
<i>Lecanora conizaeoides</i>	.	II	III	I	III	I	II	+	.
<i>Physcia tenella</i>	.	.	II	II	II	.	II	III	II
<i>Caloplaca species</i>	.	II	.	.	II	.	.	+	.
<i>Candelariella vitellina</i>	.	.	.	.	.	I	.	I	+
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	.	.	.	.	.	I	.	I	+
<i>Caloplaca pyracella</i>	.	.	.	.	.	.	+	I	+
<i>Physconia detersa</i>	.	.	.	.	.	.	.	+	II
<i>Cladonia coniocraea</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	II

римские цифры характеризуют постоянство вида в группировке

На основе анализа распространения выявленных группировок по территории города выделены и охарактеризованы 4 основные зоны:

Таким образом, **зона 1** – зона обедненных группировок лишайников (1,2), представленных в таблице с доминированием одного или двух видов листоватонакипных форм рода *Physcia* и двух видов накипных форм рода *Lecanora* и *Caloplaca* (рН_{суб} 7,1 и 6,4 соответственно). Эти группировки

распространены вдоль дорог с интенсивным движением. В **зоне 2** композиция видов лишайников (3) с высоким постоянством *Scoliciosporum chlorococum* и

Parmelia sulcata имеют сходные экологические показатели освещенности, температуры, влажности, кислотности реакции среды, эвтрофности субстрата. Лишайники этих группировок типичные ацидофилы ($pH_{\text{суб}}=5,3$). Они характерны для интенсивно используемых территорий, представленных искусственными парками, аллеями. Число видов в группировке возрастает до 8. **Зона 3** включает в себя зоны с остатками естественной древесной растительности. Здесь преобладают группировки лишайников (4,5,6) с высоким постоянством видов *Xanthoria parietina* и *Physconia perisidiosa*. Они являются типичными нейтрофилами и различаются по эвтрофности субстратов. Число видов колеблется от 8 до 10. **Зона 4** - 7,8,9 группировки лишайников с высоким постоянством видов *Phaeophyscia nigricans*, *Xanthoria fallax*. Эта зона охватывает территорию естественных лесов. Для этих групп характерно появление кустистых видов лишайников рода *Cladonia*. По экологическим параметрам виды данных группировок особенно требовательны к условиям освещения. По отношению к субстрату данные виды являются яркими представителями ацидофилов ($pH_{\text{суб}}= 4,0-6,4$). Число видов возрастает от 16 до 20.

В работе показано, что выявленные лишайниковые группировки являются хорошими индикаторами среды, так как являются готовыми «образцами» лишайниковых сообществ, сформированными условиями среды (загрязнение воздуха, кислотность субстрата, освещенность, влажность и др.). Это затрудняет использование лишайниковых группировок для оценки качества атмосферного воздуха. Однако они представляют интерес в целях интегральной оценки качества окружающей среды.

Глава 6. Разработка модели оценки качества воздуха по показателю морфологического состояния талломов лишайников

Одним из путей, ограничивающих влияние абиотических и биотических факторов на лишеноиндикационные показатели, является переход от биоценотического уровня, рассматривающего целые сообщества, к организменному уровню, рассматривающему состояние отдельных видов (Scott M. G., Hutchinson T.C. 1989, 1990; Отнюкова Т.Н., 1997; Михайлова И.Н., Воробейчик Е.Л., 2001).

Поглощенные лишайниками загрязняющие вещества оказывают влияние на физиологические процессы внутри талломов, нарушение которых впоследствии и проявляется на внешнем облике лишайников в виде морфологических изменений: деформаций и угнетений развития талломов. Однако отсутствие объективных количественных показателей состояния талломов лишайников существенно сдерживает использование данных изменений в оценке качества воздуха.

В данной работе предложен качественно новый метод, предполагающий проведение исследований по дифференциации районов города на основе использования математического подхода к получению объективной количественной оценки состояния талломов лишайников. Для этого в работе выбраны виды лишайников для предложенного метода, обоснован объективный количественный показатель состояния талломов лишайников, разработана методика его оценки и использования в целях биоиндикации атмосферного загрязнения урбанизированной территории.

При выборе видов лишайников обоснована необходимость учета следующих критериев: распространённость по территории города, позволяющая оценивать качество воздуха на большей части территории города, и морфологическое строение талломов, обеспечивающее отсутствие механических повреждений при сборе образцов. В работе выявлено, что наиболее полно данным критериям в условиях урбанизированной территории удовлетворяют лишайники вида *Physcia stellaris* и *Parmelia sulcata*. Для выбора показателя состояния талломов лишайников в работе построено дерево целей (рис. 5).



Рис. 5. Дерево целей решения задачи выбора и обоснования показателя (индекса) состояния талломов лишайников

В качестве названия показателя, характеризующего состояние талломов лишайников, предложено использовать «индекс структуры» - $I_{стр}$, поскольку морфологические изменения лишайников связаны, как правило, с изменением структуры талломов. Для выбора математических аналогов талломов лишайников в настоящей работе использована теория фракталов. В результате установлено соответствие структуры талломов лишайников выбранных видов структуре дендритных фрактальных кластеров (рис.6).

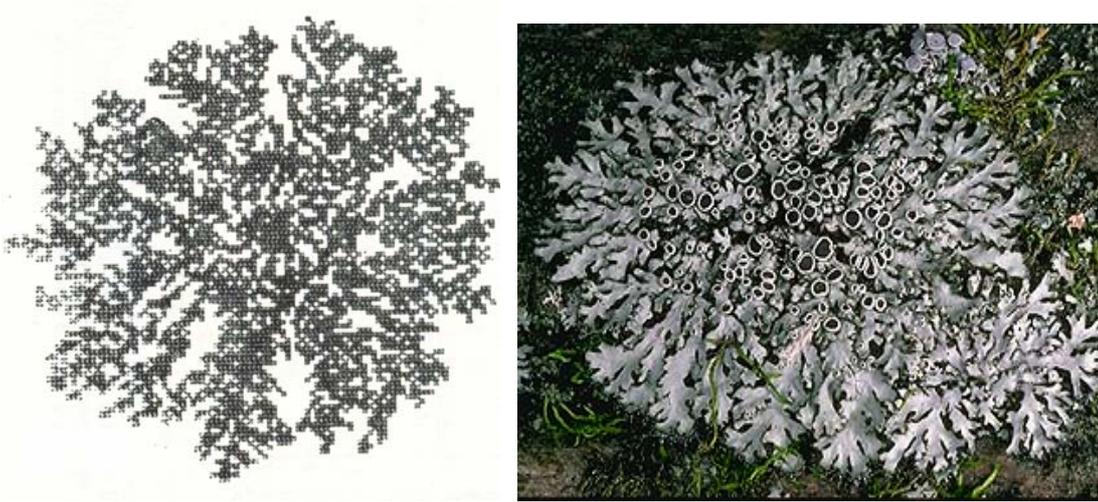


Рис. 6. Фрактальная природа лишайников: слева - структура дендритного фрактального кластера, сгенерированного программой; справа – лишайник *P. stellaris*

Помимо визуального соответствия талломов лишайников структуре фрактальных кластеров, на рис. 7 приведено математическое доказательство фрактальности лишайников: показано выполнение основного свойства фрактального кластера – уменьшение плотности его заполнения при увеличении радиуса.

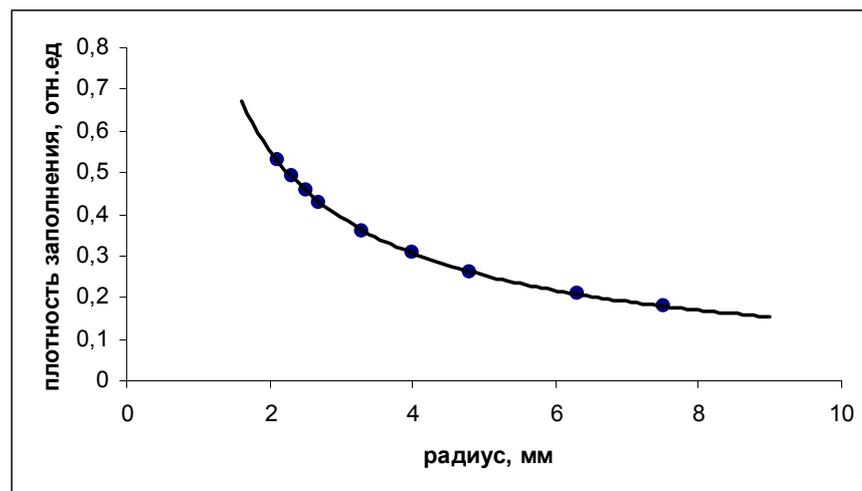


Рис.7 График изменения плотности заполнения таллома лишайника *P. stellaris* по радиусу

В результате обоснована возможность использования основного показателя фрактального объекта – фрактальной размерности в качестве физического определения $I_{стр}$ талломов лишайников. Поскольку фрактальная размерность кластера характеризует степень его заполнения, физическим смыслом $I_{стр}$ является степень заполнения (разветвления лопастей) таллома лишайника.

Для исследования возможности оценки качества атмосферного воздуха урбанизированной территории на основе $I_{стр}$ талломов лишайников *P. stellaris* проведён корреляционный анализ между индексом загрязнения атмосферы (ИЗА) и $I_{стр}$ (рис. 8).

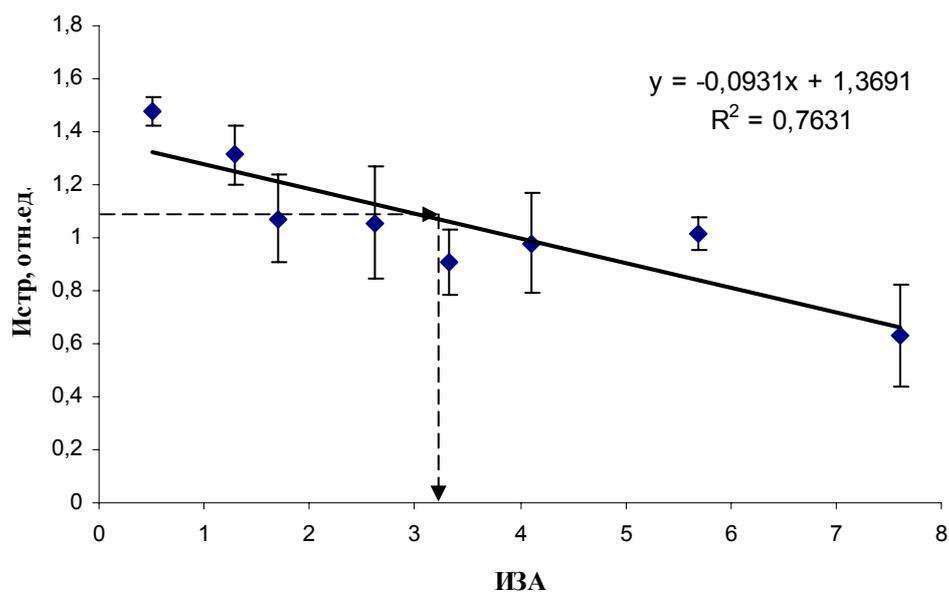


Рис. 8. График зависимости между $I_{стр}$ и ИЗА

Как видно из графика, приведенного на рис. 8, увеличение степени атмосферного загрязнения приводит к уменьшению $I_{стр}$ талломов лишайников *P. stellaris*. По-видимому, это связано с тем, что поверхностные участки таллома лишайника подвержены максимальному действию токсикантов при минимальной степени их защищенности. Это вызывает возникновение некрозов и повреждение талломов, что и является причиной снижения их плотности. С другой стороны, уменьшение плотности талломов можно рассматривать как результат защитной реакции лишайника на загрязнение: уменьшение относительной поверхности, контактирующей с загрязнённым воздухом, сокращает поступление вредных веществ в талломы и, тем самым, уменьшает токсическое действие поллютантов.

На основе установленной математической зависимости $I_{стр} = f(ИЗА)$ и известных градаций атмосферного загрязнения по ИЗА, выведены критерии оценки загрязнения атмосферы г.Уфы по показателю $I_{стр}$ талломов *P. stellaris* (табл. 2).

Таблица 2. Критерии оценки загрязнения воздуха на основе значений $I_{стр}$

Градация	Загрязнение воздуха	ИЗА	$I_{стр}$ <i>P. stellaris</i>
I	Низкое	0 - 4	1,37 - 1,00
II	Повышенное	5 - 6	0,90 - 0,81
III	Высокое	7 - 13	0,72 - 0,16
IV	Очень высокое	> 14	< 0,07

Важным преимуществом полученной градации является то, что с её помощью возможно оценить качество атмосферы во многих районах г.Уфы, в том числе и в районах, где отсутствуют автоматизированные станции контроля состояния атмосферы.

Поскольку установленная в работе градация пригодна для оценки качества атмосферного воздуха только в г.Уфе, для использования предложенного способа для других территорий разработан алгоритм, приведённый на рисунке 9.



Рис. 9. Алгоритм реализации предложенного способа оценки качества воздушного бассейна с помощью показателя состояния талломов лишайников.

Выделены основные преимущества предложенного подхода:

- отсутствие необходимости выявления полного видового состава лишайников, что упрощает применение лишеноиндикационных методов в системе мониторинга качества окружающей среды;
- получение интегральной оценки степени атмосферного загрязнения за счёт наличия корреляционной связи между показателем состояния талломов лишайников и интегральным показателем ИЗА;
- устранение субъективной оценки состояния талломов лишайников;
- получение возможности типизировать условия отбора проб и оценивать последствия воздействия атмосферного загрязнения на этапах до возникновения существенных изменений в видовом составе.

Предложенный в настоящей работе подход лег в основу способа оценки состояния атмосферного воздуха с помощью лишайников.

Глава 7. Исследование применения показателя состояния талломов для эспресс-диагностики состояния лишайниковых сообществ

Для изучения возможности использования показателя состояния талломов лишайников $I_{стр}$ в целях диагностики состояния лишайниковых сообществ в условиях атмосферного загрязнения урбанизированной территории установлены значения $I_{стр}$ талломов *Physcia stellaris* и *Parmelia sulcata*, произрастающих в условиях доминирования различных типов лишайниковых группировок.

Как было показано в результате изучения лишайниковых группировок, на территории города можно выделить 4 основные зоны, характеризующиеся различным состоянием лишайниковых сообществ: зона 1 - зона, подверженная наибольшему антропогенному воздействию, представлена наиболее деградированными лишайниковыми группировками; зона 4 - представлена наименее нарушенными лишайниковыми группировками (табл.1). Значения $I_{стр}$ талломов лишайников *Physcia stellaris* и *Parmelia sulcata*, произрастающих в условиях лишайниковых группировок, относящихся к различным зонам, приведены в таблице 3.

Таблица 3. Значения $I_{стр}$ *Physcia stellaris* и *Parmelia sulcata*, произрастающих в зонах доминирования различных лишайниковых группировок

$I_{стр}$ <i>Physcia stellaris</i>	1,02 \pm 0,01	1,15 \pm 0,09	1,38 \pm 0,10	1,44 \pm 0,01
$I_{стр}$ <i>Parmelia sulcata</i>	-	1,29 \pm 0,09	1,18 \pm 0,07	1,09 \pm 0,01
Зоны	1	2	3	4

Для диагностики состояния лишайниковых сообществ на исследуемой территории на основе полученных диапазонов значений $I_{стр}$ талломов лишайников *Physcia stellaris* и *Parmelia sulcata* рассмотрено два подхода: первый учитывает $I_{стр}$ талломов лишайников только одного из видов *P. stellaris* или *P. sulcata*, второй – одновременно обоих видов. Отмечено, что в случае использования показателей $I_{стр}$ обоих видов (т.е. одновременного учета выполнение 2 критериев), конечные выводы о состоянии лишайниковых сообществ является более достоверными. Однако при этом возникает задача - каким образом оценить и связать между собой выполнение данных критериев. Для решения этой задачи в данной работе предложено использовать элементы теории нечетких множеств.

В результате применения данной теории введена лингвистическая переменная НЕНАРУШЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, принимающая нечёткие значения *ненарушенный*, *нарушенный*, и *деградированный*. Эти значения соответствует зонам 4, 3 и 2, приведенным в таблице 3. Зона 1, характеризующаяся наиболее деградированным состоянием лишайниковых группировок, была пропущена в связи с присутствием только 1 вида лишайника *P. stellaris*, что снимает необходимость проверки двух критериев для таких сообществ.

Для оценки степени «ненарушенности» лишайникового сообщества введена функция принадлежности μ ($0 \leq \mu \leq 1$). На рис. 10 приведены функции принадлежности сообществ лишайников, произрастающих в различных зонах, на основе $I_{стр}$ лишайников *P. stellaris* (μ_1) и *P. sulcata* (μ_2).

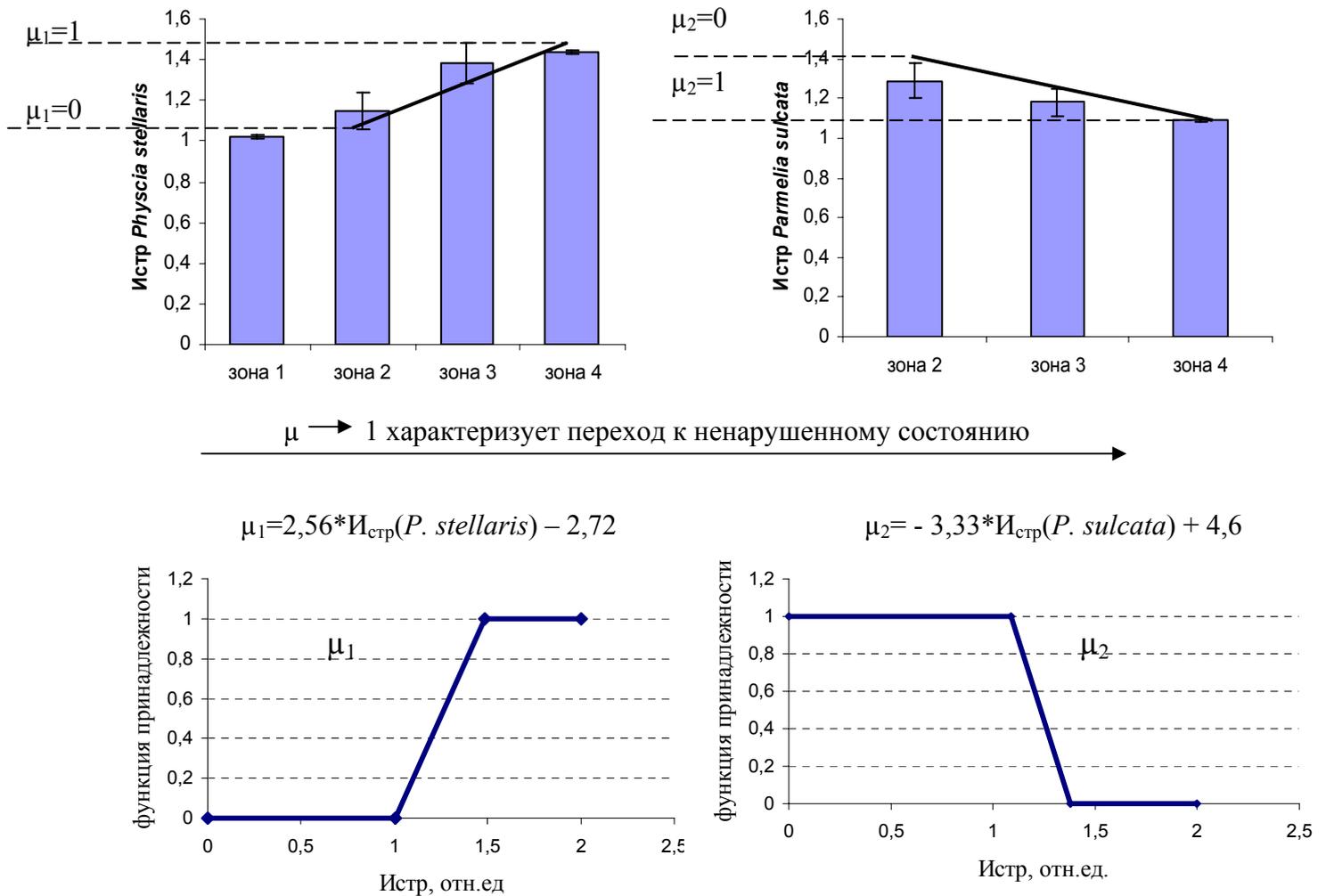


Рис.10. Функция принадлежности сообщества лишайников к **НЕНАРУШЕННОМУ СОСТОЯНИЮ** по $I_{стр}$ *P. stellaris* (μ_1) и *P. sulcata* (μ_2).

Наибольшее значение функции принадлежности $\mu=1$ соответствует зоне, представленной ненарушенными, наименьшее $\mu=0$ – зоне, представленной деградированными сообществами лишайников. Таким образом, функция принадлежности оценивает степень принадлежности лишайникового сообщества к наименее нарушенному состоянию на основе значений индекса структуры $I_{стр}$ талломов лишайников *P. stellaris* и *P. sulcata*

Для оценки состояния лишайниковых сообществ по значениям показателя $I_{стр}$ талломов лишайников обоих видов одновременно функции принадлежности μ_1 и μ_2 были свернуты в один комплексный показатель S , вычисляемый по формуле $S = \alpha \mu_1 * \beta \mu_2$, где α и β – весовые коэффициенты для *P. stellaris* и *P. sulcata*. В данной работе был рассмотрен случай, когда $\alpha = \beta = 1$, т.е. $I_{стр}$ обоих видов *P. stellaris* и *P. sulcata* имеет одинаковые весовые коэффициенты.

На рис. 11 приведены интервалы, характеризующие значения, которые принимает показатель S для различных состояний лишайниковых сообществ.

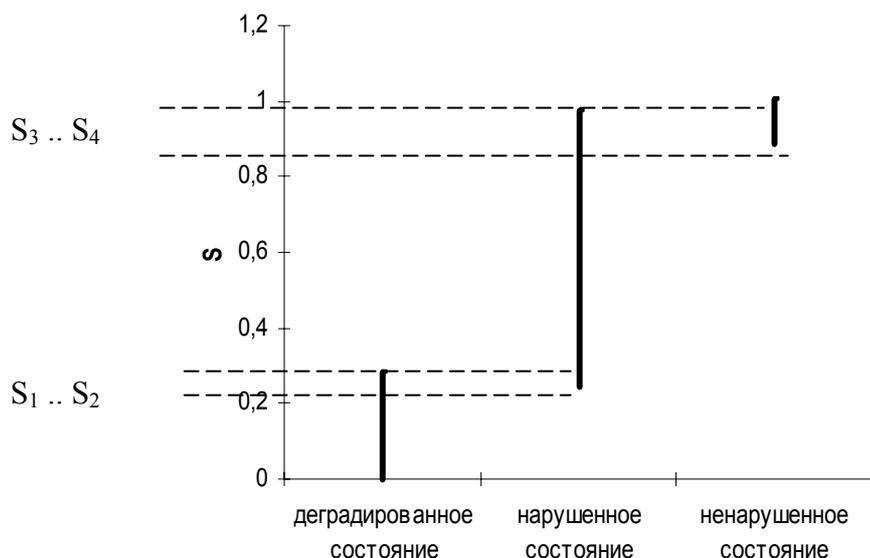


Рис.11. Значения комплексного показателя S для различных состояний лишайниковых сообществ

Поскольку комплексный показатель S рассчитывается на основе функции принадлежности сообществ по $I_{стр}$ обоих видов *P. stellaris* и *P. sulcata*, приведенные на рис. 11 интервалы предполагают выполнение одновременно двух критериев при оценке состояния лишайниковых сообществ по показателю талломов $I_{стр}$. При этом перекрывающиеся области $S_1..S_2$ и $S_3..S_4$ представляют интерес для целей ранней диагностики изменений, происходящих в лишайниковых группировках, поскольку они характеризуют переходные состояния.

Предложенный в данной работе подход, основанный на использовании $I_{стр}$ *P. stellaris* и *P. sulcata*, позволяет диагностировать состояние и отслеживать изменения, происходящие в лишайниковых сообществах в условиях урбанизированных территорий под воздействием атмосферного загрязнения.

ВЫВОДЫ

Исследования по совершенствованию методов лишеноиндикации для оценки качества атмосферного воздуха урбанизированной территории позволяют сделать следующие выводы:

1. Получены показатели по видовому составу и структуре лишенобиоты, которые свидетельствуют о существенных изменениях, происходящих в лишайниковых сообществах в условиях урбанизированной территории. Установлено, что в состав лишенобиоты г.Уфы входит 52 вида лишайников. При этом доминируют виды лишайников семейства *Physciaceae* и *Parmeliaceae*. Из жизненных форм преобладают листовато-накипные и накипные виды. Отмечено наличие в г. Уфе характерного для многих урбанизированных городов процесса формирования синантропной лишенобиоты, представленной видами: *Physcia*

dubia, *P. stellaris*, *P. tribacea*, *Scoliciosporum chlorococcum*, *Xanthoria parietina*, *Caloplaca sp*, *Lecanora sp*.

2. Проанализирована возможность использования показателей по видовому составу лишайников для целей временного и пространственного мониторинга качества воздуха урбанизированной территории. Предложены подходы использования данных по видовому составу лишайников, произрастающих в различных районах города, для целей долговременного мониторинга. Показана необходимость учета чувствительности видов лишайников и предварительного установления классов чувствительности при проведении лишеноиндикационных исследований на урбанизированной территории.

3. Изучена возможность проведения пространственного мониторинга на урбанизированной территории на основе распространения лишайниковых группировок. Установлено, что основные лишайниковые группировки г.Уфы представлены следующими доминирующими видами: *Physcia stellaris*, *P. dubia*, *P. nigricans*, *Scoliciosporum chlorococcum*, *Xanthoria parietina*, *X. fallax*, *Physconia peresidiosa* и *Cladonia coniocrae*. Показано, что выявленные группировки являются хорошими индикаторами комплексного состояния среды, но не являются достоверными индикаторами для оценки качества воздуха из-за зависимости условий их формирования от комплекса дополнительных абиотических и биотических факторов, не связанных с загрязнением.

4. Исследовано влияние атмосферного загрязнения на организменный уровень организации лишайников. Установлено, что в качестве основных изменений на организменном уровне организации лишайников, представляющих интерес для целей биомониторинга, являются морфологические изменения талломов. Для оценки состояния талломов лишайников в условиях атмосферного загрязнения впервые предложен объективный количественный показатель состояния талломов лишайников - индекс структуры ($I_{стр}$); разработана методика сбора образцов талломов и изучено влияние атмосферного загрязнения на значение предложенного показателя. Установлено, что увеличение степени атмосферного загрязнения приводит к уменьшению $I_{стр}$ *P. stellaris*.

5. Найдены эмпирические уравнения, связывающие $I_{стр}$ *P. stellaris* с комплексным показателем – индексом загрязнения атмосферы (ИЗА), что позволило определить градации качества атмосферного воздуха по значению показателя индекса структуры талломов лишайников *Physcia stellaris*: низкое загрязнение 1,37-1,00; повышенное – 0,90-0,81; высокое 0,72-0,16; очень высокое - < 0,07. Предложен новый метод использования лишайников для дифференциации районов города по степени атмосферного загрязнения на основе определения $I_{стр}$ талломов лишайников.

6. Установлена взаимосвязь между изменениями на организменном и биоценотическом уровне организации лишайников. Выявлены области значений индекса структуры талломов лишайников *Physcia stellaris* и *Parmelia sulcata*, произрастающих в условиях доминирования различных видов лишайниковых группировок. В результате предложен подход, позволяющий проводить экспресс-диагностику состояния лишайниковых сообществ по показателю талломов лишайников ($I_{стр}$).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. **Красногорская Н.Н., Байбаков Э.И., Цвиленева Н.Ю., Миннуллина Г.Р.** Лихеноиндикация в оценке загрязнения атмосферы города // Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования. Том 2./ Под редакцией: В.П. Савиных, В.В. Вишневого.-М.: Академия наук о Земле, 2000.-с.15-16
2. **Красногорская Н.Н., Легуш Э.Ф., Миннуллина Г.Р.** Биоиндикация качества воздуха в Уфе по распространению эпифитных лишайников // XXVII Гагаринские чтения: Материалы Международной молодежной научной конференции. Москва, 2-7 апреля 2001 г. /Том 7/ -М.: Изд-во «Мати», 2001. – с. 14-15
3. **Миннуллина Г.Р., Дзинтер Е.В.** Применение теории фракталов в лихеноиндикации // Актуальные проблемы современной науки: Тезисы докладов 2-ой Международной конференции молодых учёных и студентов. Естественные науки. Часть 5. Секция: Экология. Самара: СамГТУ. 2001. – с. 43
4. **Миннуллина Г.Р.** Лихеноиндикация как показатель устойчивости состояния окружающей среды // Проблемы устойчивого развития глазами молодёжи: Тезисы докладов Международного научно-практического форума молодых учёных “ ”. М.: “Ноосфера”, 2001. – с. 115-117
5. **Красногорская Н.Н., Легуш Э.Ф., Миннуллина Г.Р.** Пероксидазная активность лишайников в условиях химического загрязнения атмосферы // Студент и научно-технический прогресс: Материалы XII-ой Международной молодежной технической конференции: Биология / Новосибирский государственный университет. Новосибирск, 2001. Ч.2. с. 33-34.
6. **Красногорская Н.Н., Легуш Э.Ф., Миннуллина Г.Р.** Исследование влияния атмосферного загрязнения на лишайниковые сообщества г.Уфы // Экология России и сопредельных территорий. Экологический катализ: Материалы VI международной экологической студенческой конференции. - Новосибирский гос. ун-т. Новосибирск, 2001. с. 52-53
7. **Красногорская Н.Н., Легуш Э.Ф., Цвиленева Н.Ю., Байбаков Э.И., Миннуллина Г.Р.** Исследование качества атмосферного воздуха методом лихеноиндикации // Наука-образование-производство в решении экологических проблем: Материалы международной научно-технической конференции. Уфа: УГАТУ, 2002. С. 63-66
8. **Красногорская Н.Н., Легуш Э.Ф., Миннуллина Г.Р.** Лихеноиндикационная оценка качества воздушного бассейна города // Экологическая безопасность и устойчивое развитие: Материалы V Международной экологической конференции студентов и молодых учёных. Москва, 18-19 апреля 2001г. /Том 2/ - М.: МГТУ, 2002. – с. 14-15
9. **Красногорская Н.Н., Легуш Э.Ф., Цвиленева Н.Ю., Байбаков И.Э., Миннуллина Г.Р.** Лихеноиндикационные методы исследования качества атмосферного воздуха // Безопасность жизнедеятельности, 2003. - № 11. – с. 26-30
10. **Красногорская Н.Н., Легуш Э.Ф., Цвиленева Н.Ю., Миннуллина Г.Р.** Изучение информативности лихеноиндикационных показателей при оценке

степени загрязнённости атмосферы // Актуальные проблемы экологии: Сборник научных работ. Т. 3, № 3 / Сибирский гос. мед. ун-т. Томск, 2004. с. 462-463

11. Красногорская Н.Н., Легуш Э.Ф., Журавлева С.Е., Миннуллина Г.Р. Использование фрактальной размерности талломов лишайников при биоиндикации атмосферного загрязнения // Научные труды Международного биотехнологического центра МГУ: тезисы докладов второй международной научной конференции «Биотехнология – охране окружающей среды» и третьей школы-конференции молодых учёных и студентов «Сохранение биоразнообразия и рациональное использование природных ресурсов», Москва, 25-27 мая 2004 г./ред. проф. А.П. Садчиков, д.б.н. С.В. Котелевцев – М.: Изд-во «Спорт и Культура», 2004. – с. 119

12. Красногорская Н.Н., Журавлёва С.Е., Легуш Э.Ф., Миннуллина Г.Р. Использование лишайников в экологическом мониторинге промышленных регионов // Реновация: отходы-технологии-доходы: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Уфа, 26-28 мая 2004 г., с.92-93

13. Красногорская Н.Н., Журавлева С.Е., Цвиленева Н.Ю., Миннуллина Г.Р., Даутова А.Т. Мониторинг атмосферного воздуха – инструмент охраны окружающей среды урбанизированных территорий // Фундаментальные исследования. - Москва, «Академия естествознания», 2004, № 5, с. 35-37

14. Красногорская Н.Н., Журавлева С.Е., Миннуллина Г.Р. Лихеноиндикационные шкалы оценки качества атмосферного воздуха // Фундаментальные исследования. - Москва, «Академия естествознания», 2004, № 5, с. 38-42

15. Журавлёва С.Е., Миннуллина Г.Р. Эпифитные лишайниковые сообщества г.Уфы // Актуальные проблемы экологии и охраны окружающей среды: Тезисы докладов Всероссийской конференции молодых учёных и студентов, г.Уфа, 18-22 октября 2004 г., с. 59-60

16. Красногорская Н.Н., Миннуллина Г.Р., Сапожникова А.К. Мониторинг естественных и техногенных экосистем на основе анализа состава и структуры лишенобиоты // Экология России и сопредельных территорий. Экологический катализ: Материалы IX международной экологической студенческой конференции / Новосибирский гос. ун-т. Новосибирск, 2004. с. 43-45

17. Красногорская Н.Н., Никитина О.В., Миннуллина Г.Р. Влияние автотранспортного загрязнения на эпифитную лишенофлору Уфы // Экология России и сопредельных территорий. Экологический катализ: Материалы IX международной экологической студенческой конференции / Новосибирский гос. ун-т. Новосибирск, 2004. с. 52-54

18. Красногорская Н.Н., Сапожникова А.К., Миннуллина Г.Р. Исследование лишенофлоры лесопарков г. Уфы // Экология России и сопредельных территорий. Экологический катализ: Материалы IX международной экологической студенческой конференции / Новосибирский гос. ун-т. Новосибирск, 2004. с. 69-70

19. Красногорская Н.Н., Даутова А.Т., Миннуллина Г.Р. Состояние лишенобиоты как экологический показатель состояния промышленных городов //

Экология и мы: Материалы Республиканской студенческой научно-практической конференции, г.Уфа, май 2004, с. 14-15

20. **Миннуллина Г.Р.** Использование индекса структуры талломов для оценки состояния лишайников в условиях загрязнения атмосферы // Безопасность жизнедеятельности: Тезисы доклада VIII республиканского конкурса научных работ студентов и аспирантов вузов РБ. Уфа: УГАТУ, 2004. – с. 40-41

21. **Красногорская Н.Н., Журавлёва С.Е., Миннуллина Г.Р., Гайфуллин А.В.** Изучение распространения лишайниковых сообществ в различных условиях атмосферного загрязнения Уфы / Сб. матер. Междун. научно-практ. конф. «Экология фундаментальная и прикладная. Проблемы урбанизации», Екатеринбург – 2005, с. 165-167

22. **Красногорская Н.Н., Цвиленева Н.Ю., Миннуллина Г.Р., Журавлёва С.Е.** Способ оценки качества атмосферного воздуха с помощью лишайников (Патент РФ 2260934 С1).

23. **Журавлева С.Е., Красногорская Н.Н., Миннуллина Г.Р.** Лишайники урбанизированных территорий (на примере г.Уфы) // Башкирский экологический вестник, 2006, № 1, с.34-37.

24. **Erika Hogan, Gulnaz Minnullina, Peter Crittenden** Nitrogen enrichment promotes phosphatase activity in *Cladonia portentosa*. Annual Scientific Meeting “Stress in yeasts and filamentous fungi”, University of Birmingham (UK), September 4-7, 2006, p. 59-60.

Соискатель

Миннуллина Г.Р.