

**ПОПУЛЯЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
Xanthoria parietina (L.) Th. Fr.
В ГОРОДАХ ПРИ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ**

Ю.Г. Суетина*, Н.В. Глотов*, Д.И. Милютин*, И.А. Кшняев**

**Марийский государственный университет*

***Институт экологии растений и животных УрО РАН*

Проведен анализ плотности и возрастной структуры популяций *X. parietina* на территории городов Йошкар-Олы и Казани. Изменение плотности популяции *X. parietina* отражает различную степень антропогенной нагрузки и является эффективным показателем при лишеноиндикационном зонировании территории. При сходных тенденциях изменения плотности популяций в городах, выявлены различия в характере изменений возрастной структуры популяций.

Ключевые слова: популяция, плотность, пространственная структура, возрастная структура, *Xanthoria parietina*.

Исследования в городах представляют интерес с точки зрения выявления комплекса приспособительных реакций живого к стрессовой среде обитания. Регистрируемые особенности особей, популяций и сообществ используются при этом для биоиндикации загрязнений среды. Задача заключается в выборе эффективных объектов для интегрального контроля состояния среды (Биоиндикация..., 1993).

В системе экологического мониторинга территорий, подверженных антропогенным воздействиям, в качестве индикаторов загрязнения атмосферного воздуха давно и успешно используются лишайники. Более или менее подробно изучены изменения, происходящие у лишайников на организменном и ценотическом уровнях организации (Бязров, 2003). В настоящее время в лишенологии формируется новое популяционное направление исследований (Scheidegger, 1995; Gauslaa, 1997; Михайлова, Воробейчик, 1999; Progress..., 2000; Суетина, 2001; Плюснин, 2004). Несмотря на отсутствие общепринятой концепции популяционной биологии лишайников и методологические и методические трудности, обсуждаемые в работе И.Н. Михайловой (2004), сходные тенденции, выявленные в приспособительных реакциях популяций лишайников к антропогенным воздействиям (Михайлова, Воробейчик, 1999; Суетина, 2001), позволяют получать новые теоретические обобщения и использовать их при решении прикладных задач.

В данной работе мы следуем общим принципам и терминологии, разработанным в популяционной биологии растений (Работнов, 1950; Уранов, 1975; Ценопопуляции..., 1988) и адаптированным к лишайникам (Суетина, 2001). При характеристике населения *X. parietina* в городах мы используем термины «популяция Йошкар-Олы» и «популяция Казани».

Цель настоящей работы — анализ структуры популяций *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. в городской среде и использование популяционных характеристик для оценки степени атмосферного загрязнения.

Материал и методы

Исследования проводили в 2001–2002 гг. в г. Йошкар-Оле (Республика Марий Эл) и г. Казани (Республика Татарстан). Йошкар-Ола находится на южном пределе района подтаежных Приуральских еловых, елово-пихтовых и елово-лиственных лесов, в поймах с примесью широколиственных видов (Абрамов, 2000), Казань — в районе подтаежных Восточноевропейских сосновых и широколиственно-сосновых лесов (Бакин и др., 2000). Города находятся в европейской части атлантико-континентальной области умеренного пояса. Климат континентальный, умеренно-влажный, с теплым летом и умеренно-холодной зимой (Агроклиматические ресурсы, 1961; Климат Казани, 1990).

Состояние воздушного бассейна Йошкар-Олы оценивается как слабо загрязненное, Казань относится к числу крупнейших административно-индустриальных центров Среднего Поволжья и входит в число городов с высоким уровнем загрязнения (Экологическое состояние..., 2001). Основными загрязняющими веществами атмосферного воздуха обоих городов являются оксиды азота и углерода, углеводороды, диоксид серы, кроме того, в Йошкар-Оле — ацетон, стирол, ксилол, толуол, в Казани — пары масел и кислот, окислы железа, алюминия, цинка, меди, сварочные аэрозоли, металлическая пыль. Доля выбросов от автотранспорта в Йошкар-Оле составляет 85%, в Казани — 60%. Загрязнение воздушного бассейна отработанными газами автотранспорта в городах имеет тенденцию к росту (Государственный доклад..., Йошкар-Ола, 2002; Государственный доклад..., Казань, 2002).

Объект исследования — листоватый лишайник *X. parietina*, вид, широко распространенный в Евразии; произрастает на коре лиственных и хвойных деревьев, на каменных кладках, на соломенных и черепичных крышах, на известняковых и силикатных скалах, на мхах и лишайниках. Особенно активно развивается на деревьях открытых мест, вид устойчив к загрязненности воздуха (Определитель..., 2004; Wirth, 1995). В Йошкар-Оле и Казани *X. parietina* произрастает на перидерме и корке разных видов лиственных деревьев, встречается на всей территории, в том числе в районах размещения крупных промышленных предприятий и вблизи автомагистралей. Слоевница *X. parietina* легко идентифицируются и имеют четко очерченные границы.

На территориях городов обследовали деревья в посадках липы сердцелистной (*Tilia cordata* Mill.), при этом выбирали группы деревьев, сходные по условиям обитания. В Йошкар-Оле, где липа преобладает в городских насаждениях, обследовано 588 деревьев из 54 местообитаний, в Казани — 493 дерева из 42 местообитаний. В каждом местообитании выбирали одноствольные отдельно стоящие деревья с длиной окружности ствола 50–100 см на высоте 1,3 м, без механических повреждений коры. Число деревьев в местообитании варьирует от 4 до 25. На высоте ствола дерева от 1,3 м до 1,8 м подсчитывали число особей *X. parietina* иматурных (im), виргинильных (v_1 и v_2), генеративных (g_1 , g_2 , g_3) возрастных (онтогенетических) групп. Выделение онтогенетических состояний проводилось по качественным морфологическим признакам (Суетина, 2001).

Плотность популяции — среднее число особей на дереве в местообитании, в зоне загрязнения, в городе.

Количественная характеристика возрастности особи *X. parietina* каждого возрастного состояния оценивается нами в долях энергии, согласно шкале, предложенной А.А. Урановым (1975) для растений. В связи с выделением у *X. parietina* возрастных состояний v_1 и v_2 по логистическому уравнению найдены значения возрастности, равные 0,0884 для v_1 и 0,1589 для v_2 . В качестве характеристики возрастной структуры популяции *X. parietina* был использован индекс возрастности (возрастность популяции — ее биологический возраст), который определяется как средневзвешенная возрастность особей (Уранов, 1975).

При анализе данных применяли критерий Вилкоксона–Манна–Уитни, критерий Крускала–Уоллиса, однофакторный дисперсионный анализ (модель II), вычисляли коэффициент ранговой корреляции Спирмена. При анализе плотности популяции использовали преобразование $\ln(x+1)$ (Готов и др., 1982). Зависимость пространственного распределения плотности популяции от координат местообитания на территории города оценивалась с помощью пошагового нелинейного регрессионного анализа. Поверхность пространственного распределения плотности популяции строили с помощью процедуры сглаживания на основе метода наименьших квадратов. Использовали пакет «Statistica 6,0» (Вуколов, 2004).

Результаты и их обсуждение

Плотность популяций. Плотность популяции в местообитаниях Йошкар-Олы варьирует от 0,8 до 66,5 слоевищ на дереве, среднее — 10,7, в Казани — от 0 (7 местообитаний) до 32,0, среднее — 0,9. На рисунке 1 местообитания Йошкар-Олы и Казани упорядочены по возрастанию плотности популяций *X. parietina*. Можно видеть, что эта последовательность представляет непрерывную линию, при этом местообитания, где *X. parietina* отсутствует или плотность слоевищ низка (левая часть кривой), находятся в основном в Казани, в то время как местообитания со средней и высокой плотностью (правая часть кривой) — в основном в Йошкар-Оле. Плотность популяции в местообитаниях Йошкар-Олы и Казани различается статистически высоко значимо (критерий Вилкоксона–Манна–Уитни, $P > 10^{-12}$).

Структура изменчивости плотности популяции (изменчивость между местообитаниями и между деревьями в пределах местообитания) была оценена с помощью однофакторного дисперсионного анализа. В Йошкар-Оле доля изменчивости плотности популяции между местообитаниями составляет 57,3%, в Казани — 48,4%. Большие различия между деревьями в пределах местообитания могут быть обусловлены микроклиматическими условиями, а также возрастом дерева и структурой коры, определяющими разное время заселения дерева слоевищами.

Анализ пространственных распределений плотности популяций выявил их зависимость от координат местообитания, т.е. от расположения местообитания на территории города (Йошкар-Ола, $P < 10^{-15}$; Казань, $P < 10^{-5}$). Поскольку мы имеем непрерывный ряд значений плотности популяции от 0 до 4,2 (в логарифмической шкале), этот ряд был разделен на 3 группы: с низкой (от 0 до 1,4), средней (от 1,5 до 2,8) и высокой плотностью (от 2,9 до 4,2). На рисунке 2 показаны проекции пространственного распределения плотности популяций на территории городов.

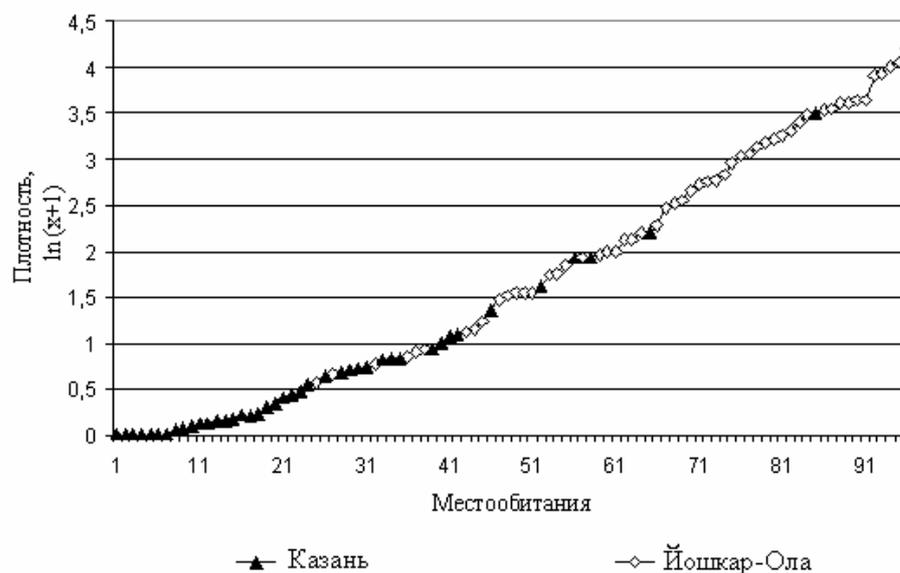


Рис. 1. Плотность популяции *X. parietina* в местообитаниях Йошкар-Олы и Казани

Область с низкими значениями плотности популяции на территории Йошкар-Олы соответствует южной промышленной зоне города (район железнодорожного вокзала и заводов). Увеличение плотности популяции происходит постепенно к окраинам города. Здесь в западной части находятся местообитания с плотностью — 50,1, 53,7 и 56,8; в северной части — 31,5, 33,8 и 35,8; в восточной части — 36,0, 37,5, 49,4 и 66,4 слоевищ на дереве.

В Казани большая часть значений плотности популяции варьирует в интервале от 0 до 2. Поэтому область, соответствующая местообитаниям с низкой плотностью, охватывает практически всю территорию города. За счет двух местообитаний выделяются области со средней и высокой плотностью в северо-восточной и юго-западной частях города: местообитания с плотностями 5,9 и 32,0 слоевищ на дереве соответственно.

Для Йошкар-Олы было проведено сопоставление значений плотности популяции с индексами чистоты атмосферы — I.A.P., полученными при лишеноиндикационном зонировании территории (Суетина, 1999). Индекс атмосферной чистоты включает показатели лишайникового покрова: количество видов — показатель, в большей степени влияющий на I.A.P. (Мартин, 1984); экологический индекс каждого вида, характеризующий среднее число видов, сопутствующих определенному виду во всех пунктах описания; показатель покрытия-встречаемости каждого вида (Le Blanc, De Sloover, 1970). В зонах сильного, умеренного и слабого загрязнения Йошкар-Олы встречается 11, 30 и 45 видов эпифитных лишайников соответственно (Суетина, 1999). Плотность популяции *X. parietina* на территории Йошкар-Олы положительно скоррелирована с I.A.P. ($r_s = 0,65$; $P = 0,00038$): большей плотности соответствуют большие значения I.A.P. (меньшая степень атмосферного загрязнения). Областям с низкой, средней и высокой плотностью

популяции *X. parietina* соответствуют зоны сильного, умеренного и слабого загрязнения. На территории Казани область с минимальной плотностью популяции включает зоны сильного и большей частью умеренного загрязнения, выделенные на основе различий по количеству видов эпифитных лишайников. В зонах сильного, среднего и слабого загрязнения отмечено 4, 9 и более 10 видов эпифитных лишайников соответственно (Байбаков, 2003). Таким образом, распределения плотности популяций *X. parietina* на территории городов отражают общие тенденции лишеноиндикационного зонирования.

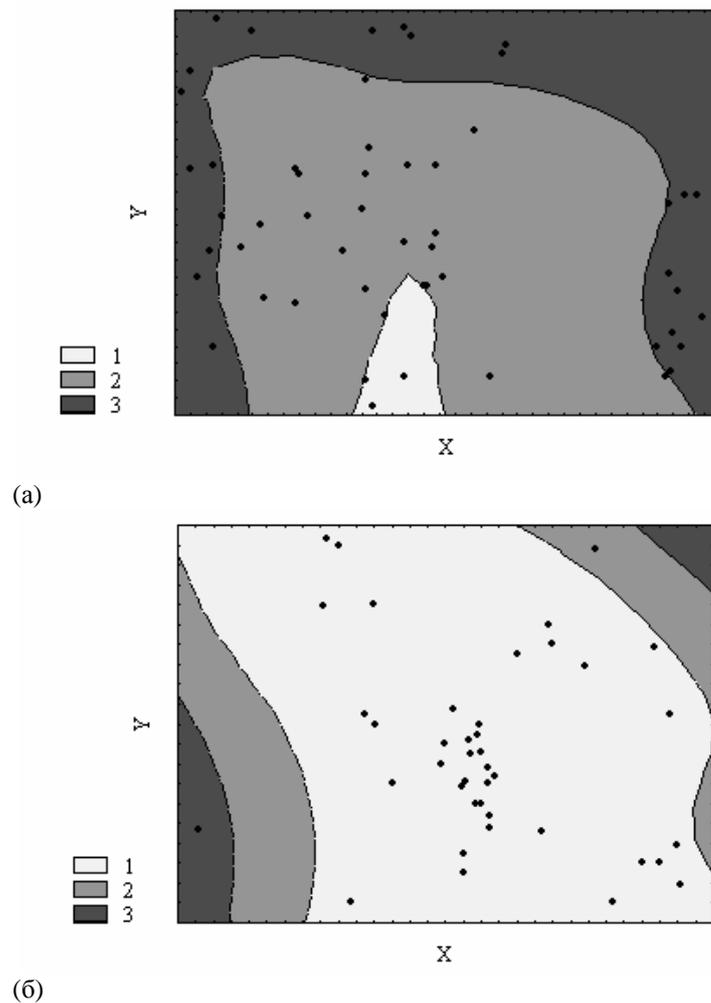


Рис. 2. Пространственное распределение плотности популяции *X. parietina* (X,Y — оси координат): а — на территории Йошкар-Олы; б — на территории Казани; 1 — область низкой, 2 — средней, 3 — высокой плотности. Точками обозначены местообитания

Необходимо отметить, что градиент степени загрязнения среды (центр — окрестности города) и сопряженные с ним изменения плотности популяции *X. parietina* не описываются линейными зависимостями, поскольку имеет место сложная мозаичная картина. Процедура сглаживания, во-первых, устраняет разницы по плотности между соседними местообитаниями, смягчая случайные флуктуации. Во-вторых, она нивелирует различия между местообитаниями, обусловленные микроусловиями среды, и возможный мозаичный характер варьирования степени загрязненности атмосферного воздуха. Второе обстоятельство, по-видимому, имеет место, поскольку при введенных границах зон по плотности (1,4 и 2,8) в Йошкар-Оле в зону низкой плотности попали 3 значения $>1,4$, в зону средней — 7 значений $<1,4$ и 5 значений $>2,8$ и в зону высокой плотности 8 значений $<2,8$. Достаточно велики и максимальные отклонения от граничных значений: 1,86 для зоны низкой плотности, 0,67 и 3,65 — для зоны средней и 1,56 — для зоны высокой плотности. В Казани в зону низкой плотности попали 3 значения $>1,4$, максимальное отклонение от граничного значения — 2,21. Выделение зон проводили произвольным заданием границ, поэтому границы, естественно, являются условными. Однако при варьировании границ выдерживается одна и та же тенденция: меньшей плотности соответствует центр и промышленные части городов. Еще раз следует подчеркнуть, что при этом сглаживается мозаичный характер распределения плотности, и полученные схемы дают лишь общее представление о градиенте антропогенной нагрузки.

Возрастная структура популяций. Плотность и возрастность популяции *X. parietina* в местообитаниях Йошкар-Олы и Казани не скоррелированы: $r_s = 0,160$ ($P = 0,25$) и $r_s = 0,167$ ($P = 0,34$) соответственно. Тем больший интерес представляет рассмотрение возрастных спектров популяций. Сопоставление 54 возрастных спектров в местообитаниях Йошкар-Олы и 25 в Казани (не рассматриваются местообитания с числом слоевищ меньше 8) показывает две особенности: ряд спектров может быть упорядочен по постепенному сдвигу вправо, другие спектры отличаются несистематическими флуктуациями частот разных возрастных групп. В Йошкар-Оле диапазон возрастных спектров выше, нередко встречаются распределения с максимумами на v_1 , g_1 и g_2 группах. В Казани отсутствуют спектры с максимумами на v_1 и g_2 группах. Объединение возрастных распределений разных местообитаний в группы с последующим их сравнением оказывается невозможным, поскольку они различаются, как правило, статистически значимо при анализе с помощью критерия хи-квадрат, т.е. имеет место гетерогенность внутри группы местообитаний. Поэтому мы пошли путем сравнения выборок (отдельные местообитания) из разных зон загрязнения по индексу возрастности с помощью непараметрических критериев. Поскольку зона сильного загрязнения в Йошкар-Оле представлена всего 5 местообитаниями, мы объединили местообитания из зон сильного и умеренного загрязнения.

Сравнение индексов возрастности зон сильного + умеренного загрязнения Йошкар-Олы, зоны слабого загрязнения Йошкар-Олы и зоны сильного загрязнения Казани обнаруживает их статистически значимые различия на 5%-м уровне (критерий Крускала–Уоллиса, $P = 0,048$). Парные сравнения с помощью критерия Вилкоксона–Манна–Уитни обнаруживают статистически значимые различия между двумя выборками из Йошкар-Олы ($P = 0,01$) и между зонами сильного + умеренного загрязнения Йошкар-Олы и сильного загрязнения Казани

($P = 0,031$). Различия между зонами слабого загрязнения Йошкар-Олы и сильного загрязнения Казани статистически не значимы ($P = 0,82$). При этом значения индексов возрастности различаются незначительно: медианы для зон сильного + умеренного загрязнения Йошкар-Олы, слабого загрязнения Йошкар-Олы и сильного загрязнения Казани равны, соответственно, 0,205, 0,243 и 0,247. Этот небольшой статистически значимый сдвиг возрастных распределений вправо прослеживается и по доле слоевищ генеративного периода: 0,296, 0,467 и 0,445. Отмеченные тенденции видны на рисунке 3.

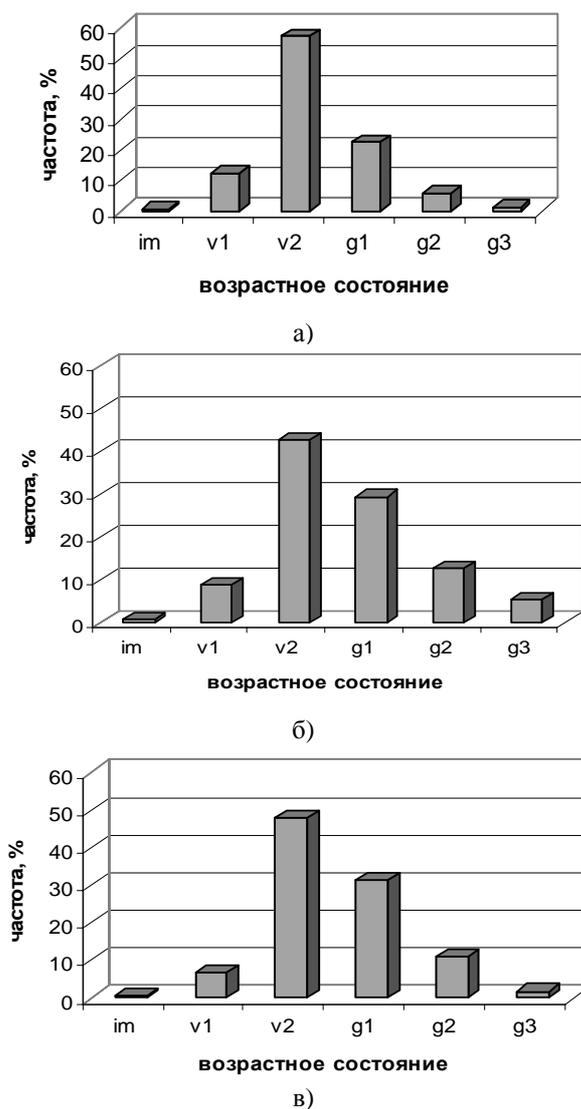


Рис. 3. Возрастная структура популяций *X. parietina*: а — Йошкар-Ола, зоны сильного + умеренного загрязнения; б — Йошкар-Ола, зона слабого загрязнения; в — Казань, зона сильного загрязнения

Заключение

Основной итог настоящей работы заключается в совпадении результатов оценок уровней атмосферных загрязнений в городах, полученных с помощью технически гораздо проще осуществимой популяционной лишеноиндикации, и с помощью традиционной лишеноиндикации, основанной на данных о лишенофлоре. При этом выявляются сходные и различные механизмы приспособленности популяций к разной степени антропогенной нагрузки. Межпопуляционные и внутривидовые изменения плотности *X. parietina* дают информацию о разной степени атмосферного загрязнения между городами и внутри каждого из городов. О большей или меньшей степени приспособленности популяций к атмосферному загрязнению можно судить по характеру возрастных спектров популяций. Относительно высокая доля генеративных особей в Казани при очень низкой плотности популяции, вероятно, может рассматриваться как адаптация к высокому уровню атмосферного загрязнения.

Для обоснованной интерпретации полученных результатов наряду с оценкой плотности и возрастной структуры популяции необходимо получить оценки жизнеспособности особей в Йошкар-Оле и Казани и провести непосредственные инструментальные замеры уровней атмосферных загрязнений хотя бы в некоторых, особенно характерных местообитаниях. Несомненный интерес представляют популяционно-лихенологические исследования в других городах, что позволит снять естественное возражение о возможном эффекте псевдоповторности (Козлов, 2003).

Авторы выражают благодарность Э.И. Байбакову за содействие в организации работы на территории Казани и Н.В. Абрамову за полезные советы.

Работа выполнена при поддержке гранта НП «Университеты России» (УР.07.01.012) и гранта МарГУ (задание Минобразования РФ).

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамов Н.В.** Флора Республики Марий Эл: инвентаризация, районирование, охрана и проблемы рационального использования ее ресурсов. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2000. 164 с.
- Агроклиматические ресурсы Марийской АССР. Л.: Гидрометиздат, 1972. 107 с.
- Байбаков Э.И.** Оценка экологического состояния урбанизированных территорий с помощью методов лишеноиндикации (на примере Казани): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2003. 167 с.
- Бакин О.В., Рогова Т.В., Ситников А.П.** Сосудистые растения Татарстана. Казань: Казан. ун-т, 2000. 496 с.
- Биоиндикация в городах и пригородных зонах. М.: Наука, 1993. С. 4.
- Бязров Л.Г.** Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный мир, 2002. 336 с.
- Вуколов Э.А.** Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2004. 464 с.
- Глотов Н.В., Животовский А.А., Хованов Н.В., Хромов-Борисов Н.Н.** Биометрия. Л.: ЛГУ, 1982. 264 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Марий Эл в 2001 году. Йошкар-Ола, 2002. 195 с.

- Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Татарстан в 2001 году. Казань, 2002. 302 с.
- Климат Казани. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 188 с.
- Козлов М.В.** Мнимые повторности (pseudoreplication) в экологических исследованиях: проблема, не замеченная российскими учеными // Журн. общ. биол., 2003. Т. 64, № 4. С. 292–307.
- Мартин Л.Н.** Лихеноиндикация в условиях различного загрязнения воздуха: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Таллин, 1984. 211 с.
- Михайлова И.Н.** Популяционная биология лишайников: проблемы и перспективы // Методы популяционной биологии: Сборник материалов VII Всероссийского популяционного семинара. Ч. 2. Сыктывкар, 2004. С. 96–101.
- Михайлова И.Н., Воробейчик Е.Л.** Размерная и возрастная структура популяций эпифитного лишайника *Hurogymnia physodes* (L.) Nyl. в условиях атмосферного загрязнения // Экология. 1999. № 2. С. 130–137.
- Определитель лишайников России. Вып. 9. Фусцидеевые, Телосхистовые. СПб.: Наука, 2004. 339 с.
- Плюснин С.Н.** Морфологическая изменчивость лишайника *Stereocaulon alpinum* (Stereocaulaceae) в тундровых экосистемах // Бот. журн. 2004. Т. 89. № 9. С. 1437–1452.
- Работнов Т.А.** Жизненный цикл многолетних травянистых растений в луговых ценозах // Тр. БИН АН СССР. Сер. 3. Геоботаника. М., 1950. Вып. 6. С. 7–204.
- Суетина Ю.Г.** Изменения эпифитной лишайнофлоры и структуры популяции *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. в городской среде. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Йошкар-Ола, 1999. 26 с.
- Суетина Ю.Г.** Онтогенез и структура популяции *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. в различных экологических условиях // Экология, 2001. № 3. С. 203–208.
- Уранов А.А.** Возрастной спектр фитоценопопуляций как функция времени и энергетических волновых процессов // Биол. науки. 1975. № 2. С. 7–34.
- Ценопопуляции растений. М.: Наука, 1988. 236 с.
- Экологическое состояние территории России. М., 2001. 128 с.
- Gauslaa Y.** Population structure of the epiphytic lichen *Usnea longissima* in a boreal *Picea abies* canopy // Lichenologist. 1997. V. 29. P. 455–469.
- Le Blanc F., De Sloover J.** Relation between industrialisation and the distribution and growth of epiphytic lichen and mosses // Can. J. Bot. 1970. V. 48. P. 1485–1496.
- Progress and Problems in Lichenology at the Turn of the Millennium: The Fourth IAL Symposium. Barcelona, 2000. P. 132–136.
- Scheidegger C.** Early development of transplanted isidioid soredia of *Lobaria pulmonaria* in an endangered population // Lichenologist. 1995. Vol. 27. P. 361–374.
- Wirth V.** Die Flechten Baden-Württembergs. Teile 2. Stuttgart: Ulmer, 1995. S. 978.