

УДК 581.524+582.29+502.3:504.5:661

СОСТОЯНИЕ СООБЩЕСТВ ЭПИФИТНЫХ ЛИШАЙНИКОВ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННЫХ НАГРУЗОК: ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ УЧЕТА ОБИЛИЯ НА ИНФОРМАТИВНОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

© 2015 г. И. Н. Михайлова*, В. С. Микрюков*, И. В. Фролов**

*Институт экологии растений и животных УрО РАН

620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

e-mail: mikhailova@ipae.uran.ru; vmikryukov@gmail.com

**Университет Южной Богемии

37005 Чешская республика, г. Ческе Будейовице, ул. Бранишовска, 31

e-mail: ivfrolov@gmail.com

Поступила в редакцию 15.01.2015 г.

Выполнен сравнительный анализ информативности показателей состояния лишайникового покрова, рассчитанных на основе двух методов оценки обилия лишайников – встречаемости и проективного покрытия. Показана тесная корреляция показателей, полученных двумя разными методами, а также их значимая связь со степенью нагрузки, что подтверждает равную правомерность их использования в лишайноиндикационных работах. Однако при сравнении информативности установлено, что индексы, базирующиеся на основе учета встречаемости, имеют более высокую разрешающую способность.

Ключевые слова: эпифитные лишайники, промышленное загрязнение, урбанизация, индексы, видовое разнообразие, встречаемость, проективное покрытие, информативность.

DOI: 10.7868/S0367059715060116

Эпифитные лишайники давно и широко применяются во всем мире в качестве индикаторов атмосферного загрязнения (Lichens, Bryophytes and Air Quality, 1988; Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens, 2002). Для количественной оценки состояния лишайниковых сообществ используют большой набор показателей, включающий видовое разнообразие, обилие, жизненное состояние, высоту поднятия по стволу индикаторных видов. Предложено много синтетических индексов, рассчитываемых на основе первичных показателей обилия и разнообразия, из которых наиболее известны индекс полеотолерантности *IP* (Трасс, 1968), индекс чистоты атмосферы *IAP* (De Sloover, LeBlanc, 1968) и их многочисленные модификации.

Среди методов оценки обилия лишайников преобладают два подхода. Первый – точное определение проективного покрытия видов (в см² или %) с помощью палетки определенного размера (10 × 10, 10 × 20 или 20 × 20 см) (Мартин, 1978; Горшков, 1986; Бязров, 1993; Михайлова, 1996; Тарасова, 2000; Пауков, 2001), причем покрытие измеряют либо с определенных сторон света, либо со стороны, обращенной к точечному источнику выбро-

сов, либо в месте максимального развития лишайникового покрова, а также на основании ствола и/или на высоте 1.3 м. Иногда проективное покрытие в дальнейшем анализе переводят в балльную оценку (Трасс, 1968). Второй подход – определение встречаемости, т.е. доли занятых лишайниками клеток в пределах рамок различного размера и конфигурации. Практикуют рамку 30 × 50 см, разделенную на 10 клеток (Nimis et al., 1990), сетку высотой 50 см и шириной, равной половине длины окружности описываемого ствола, разделенную также на 10 клеток (Herzig, Urech, 1991), вертикальную “лестницу” из пяти последовательно расположенных квадратов размером 10 × 10 см (Asta et al., 2002).

Многочисленность лишайноиндикационных работ и предложенных методов обусловила появление сравнительных исследований, посвященных поиску наиболее информативных показателей. Практически в каждой работе авторы сравнивают использованные показатели по степени их трудоемкости и субъективизма, а также по количеству выделенных изотоксических зон и сходству их конфигурации. Чаще информативность показателя оценивают по степени корреляции с

результатами инструментальных измерений содержания поллютантов в воздухе или депонирующих средах. Наиболее масштабным из этой группы работ был “швейцарский проект” (Ammann et al., 1987; Herzig, Urech, 1991), в ходе которого протестировали 20 модификаций *IAP*, вычисленных на основе разных показателей лишайниковых сообществ (покрытия, встречаемости, жизненности) в двух вариантах – с учетом всех встречаемых видов или при работе с редуцированным списком (из анализа исключали виды, не коррелирующие со степенью загрязнения, и виды с единичной встречаемостью). Была оценена теснота связи индексов с результатами инструментального мониторинга и показано, что с концентрациями поллютантов в воздухе наилучшим образом коррелирует сумма встречаемостей видов редуцированного списка.

Однако во многих работах корреляции показателей с содержанием токсикантов или выявляются весьма слабые (например, Михайлова, Воробейчик, 1995; Scheidegger, Mikhailova, 2000), или не выявляются совсем. Вероятными причинами этого могут быть: 1) сочетанное действие на лишайники большого комплекса токсикантов (а не одного, используемого в анализе); 2) использование данных о токсикантах за короткий промежуток времени, не соответствующих многолетней картине загрязнения; 3) влияние на лишайники комплекса факторов местообитания, модифицирующих влияние токсикантов (Бязров, 2002). Поэтому выводы об информативности показателей нельзя основывать только на корреляционном анализе.

Цель настоящей работы – сравнение информативности показателей состояния лишайникового покрова, базирующихся на двух методах оценки обилия лишайников – встречаемости и проективного покрытия. Анализ выполнен для широкого спектра условий (три района, различающиеся видами форофитов, количеством и схемой расположения пробных площадей, методом определения проективного покрытия лишайников), что позволяет оценить общность полученных выводов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Анализируемые данные собраны в разные годы в целях оценки влияния на эпифитные лишайники эмиссий предприятий цветной металлургии – Карабашского медеплавильного завода (КМЗ, 2010 г.) и Кировградского медеплавильного комбината (КМК, 1994 г.), и комплекса факторов городской среды (г. Екатеринбург, 2010 г.). КМЗ расположен на Южном Урале, в 90 км к северо-западу от г. Челябинска, в подзоне предлесостепных сосново-березовых лесов, КМК – на Среднем Урале, в 87 км к северу от г. Екатеринбурга, в под-

зоне южной тайги. Пробные площади располагали по трансектам от источников выбросов (на удалении от 1 до 40 км в восточном направлении от КМК, от 1 до 32 км – к северу и югу от КМЗ) и в дальнейшем были сгруппированы в три зоны загрязнения – фоновую, буферную и импактную. Источники выбросов и закономерности трансформации различных компонентов лесных экосистем подробно описаны ранее (Комплексная экологическая оценка, 1992; Воробейчик и др., 1996; Scheidegger, Mikhailova, 2000; Purvis et al., 2004; Kozlov et al., 2009; Сморкалов, Воробейчик, 2011).

При оценке влияния факторов городской среды пробные площади располагали в сосновых древостоях как в черте г. Екатеринбурга (6 площадей), так и за его пределами (6 площадей в окрестностях оз. Чусовское и Глухое) и соответственно были интерпретированы как две зоны нагрузки – импактная и фоновая. Описание параметров среды приведено ранее (Золотарев, Бельская, 2015; Сморкалов, Воробейчик, 2015).

Встречаемость лишайников (в баллах от 1 до 10) определяли с помощью сетки (Herzig, Urech, 1991) на основании ствола и высоте 1–1.5 м на половине ствола с максимально развитым лишайниковым покровом. Проективное покрытие определяли с помощью палетки 10 × 10 см с ячейей 1 см² на основании ствола и высоте 1.3 м. Детально материал описан в табл. 1. В районе КМК не учитывали *Scoliciosporum chlorococcum* (вид с высокой толерантностью).

На основе полученных данных были вычислены соответствующие пары показателей: видовая насыщенность (среднее количество видов на стволе, учтенных палеткой и сеткой); индекс разнообразия Шеннона (на основе данных о покрытии и встречаемости); суммарное обилие (сумма покрытий и сумма встречаемостей видов); индексы чистоты атмосферы, вычисленные на основе значений покрытия (1) и встречаемости (2):

$$IAP_c = \sum_1^n Q_i c_i, \quad (1)$$

$$IAP_f = \sum_1^n Q_i f_i, \quad (2)$$

где Q_i – количество видов, сопутствующих i -му виду; c_i – покрытие i -го вида, определенное с помощью палетки; f_i – встречаемость i -го вида, определенная с помощью сетки; n – количество видов, учтенных рамкой или палеткой.

В качестве меры информативности показателя использовали F -отношение Фишера (для всего градиента) и величину эффекта (effect size) d по Коэну (для двух контрастных зон загрязнения –

Таблица 1. Объем материала и методика определения проективного покрытия

Район, форофит	Количество			Расположение палетки
	площадей*	деревьев на площадь	палеток на дерево	
Карабаш, <i>Betula pendula</i> Roth.	9 (3 + 4 + 2)	10	8	С, Ю, В, З на основании ствола и высоте 1.3 м
Кировград, <i>Abies sibirica</i> Ledeb.	15 (5 + 5 + 5)	10–20	2	Со стороны максимального покрытия на основании ствола и высоте 1.3 м
Екатеринбург, <i>Pinus sylvestris</i> L.	12 (6 + 6)	5	2	

* Приведено общее количество площадей и их распределение по зонам нагрузки (фоновая + буферная + импактная, фоновая + импактная).

Таблица 2. Коэффициенты линейной корреляции индексов, вычисленных на основе двух методов учета лишайников (учетная единица – дерево)

Индексы	Город		
	Карабаш	Кировград	Екатеринбург
Видовая насыщенность	0.85	0.72	0.84
Суммарное обилие	0.66	0.52	0.81
Индекс Шеннона	0.84	0.69	0.73
<i>IAP</i>	0.74	0.65	0.88

Примечание. Во всех случаях коэффициенты статистически значимы ($p < 0.05$).

импактной и фоновой). Для нормализации распределений данные были предварительно логарифмированы. Для проверки гипотезы об эквивалентности методов учета обилия лишайников, т.е. идентичности трендов их изменения в градиенте загрязнения и одинаковой разрешающей способности, использовали непараметрический ANOVA для скорректированных рангов (Leys, Schumann, 2010), с помощью которого тестировали значимость взаимодействия “зона загрязнения × метод”. Проверку различий d между разными методами учета проводили с помощью бутстрепа (10000 повторений), рассчитывая 95%-ный доверительный интервал разницы d : если полученный интервал d не включал ноль, считали, что величины эффекта значимо различаются. Все приведенные p -значения включают поправку на множественные сравнения (*FDR*, false discovery rate). Все расчеты выполнили в ПО R v.2.15.0 (R Core Team, 2014).

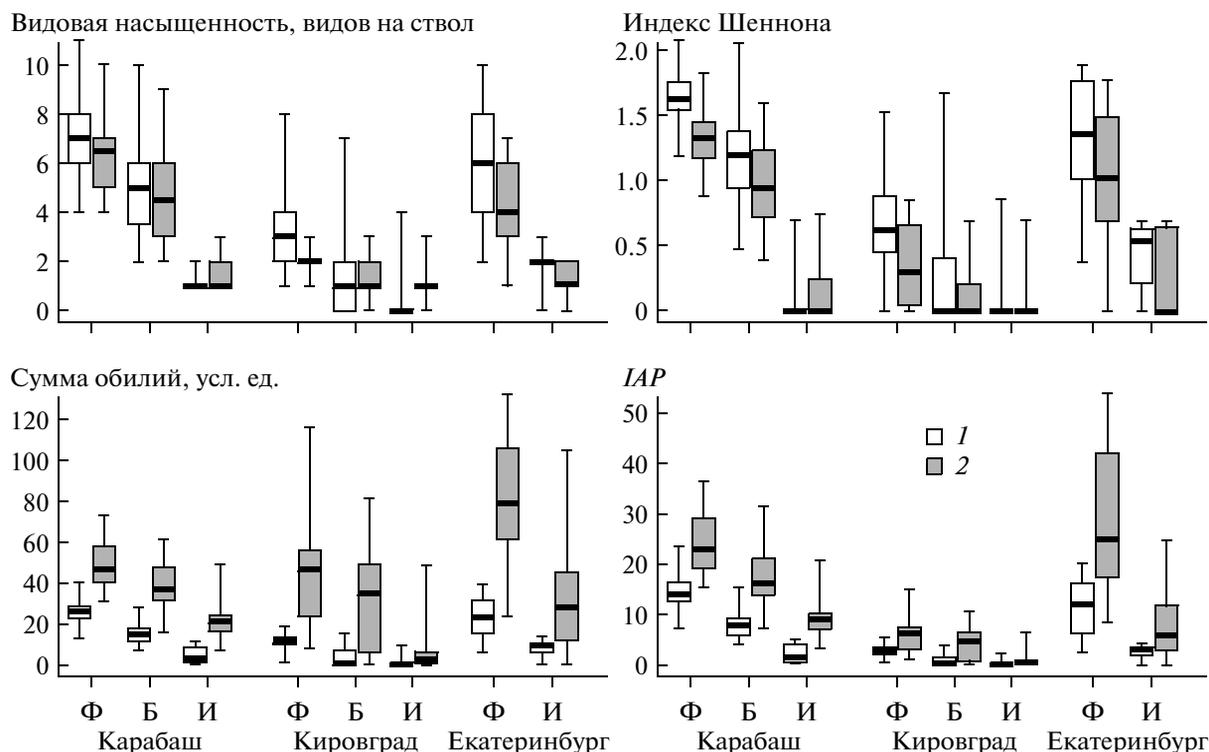
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Во всех исследуемых районах индексы состояния лишайниковых сообществ, полученные с использованием двух разных оценок обилия, тесно коррелируют (табл. 2). Под влиянием токсической нагрузки происходит деградация эпифитных лишайниковых сообществ, выражающаяся в снижении количества видов и их обилия (см. ри-

сунок). Влияние нагрузки на все индексы значимо при обоих вариантах оценки обилия лишайников (табл. 3). Во всех случаях F -отношение выше у индексов, вычисленных на основе учета встречаемости. Двухфакторный дисперсионный анализ показал значимое взаимодействие факторов “зона нагрузки × метод определения обилия” в 7 случаях из 12 (см. табл. 3). Величина эффекта d в большинстве случаев также выше при использовании показателя встречаемости, а не покрытия; в 4 случаях из 12 обнаружены значимые различия величин d , полученных разными методами учета обилия.

Максимальные величины обоих показателей информативности для большинства индексов отмечены в районе КМЗ, причем наиболее информативен индекс разнообразия Шеннона, тогда как в остальных районах более информативны традиционные для лишеноиндикации показатели (возле КМК – суммарное обилие и *IAP*, в районе Екатеринбурга – видовая насыщенность и *IAP*).

Согласно определению, информативность параметра высока тогда, когда, с одной стороны, существует большой размах значений в градиенте нагрузки, а с другой – низкая вариабельность внутри одной градации нагрузки. Высокая информативность индексов состояния лишайникового покрова в районе КМЗ в определенной степени обусловлена их высокими значениями в фо-



Индексы состояния лишайниковых сообществ, вычисленные на основе учета встречаемости (1) и проективного покрытия (2).

Зоны воздействия: Ф – фоновая, Б – буферная, И – импактная. Показана медиана (горизонтальная жирная линия), первый и третий квартили (границы прямоугольников), минимальное и максимальное значения (вертикальные линии).

новой зоне (в первую очередь более высоким видовым богатством – 39 видов лишайников на березе по сравнению с 21 видом на пихте в районе КМК и 21 видом на сосне в Екатеринбурге). Ряд показателей в районе Екатеринбурга имеют либо сходные величины или даже превосходят их (например, суммарное обилие лишайников), однако высокое варьирование в пределах одной зоны приводит к снижению их информативности. В условиях города высокое варьирование обусловлено разнонаправленным действием многочисленных факторов среды городских и пригородных лесов (пожары, эвтрофикация коры, различная степень фрагментированности местообитаний и др.).

Поскольку все использованные индексы в той или иной степени связаны с количеством зарегистрированных видов, для интерпретации результатов важно обратить внимание на различия в количестве видов, попадающих в учетную площадку при разных способах оценки обилия. На фоновой территории при любых вариантах наложения палеток учитывается меньшее количество видов по сравнению с сеткой (см. рисунок). В буферной зоне величина различий между разными методами снижается, а на импактной территории при учете палеткой среднее количество видов на стволе в ряде случаев оказывается даже выше по срав-

нению с учетом сеткой. Это может быть связано как с размерами учетной площадки, так и с особенностями наложения сетки на ствол. Поскольку площадь сетки не фиксирована и зависит от размера ствола, то встречаемость фактически равна доле поверхности ствола, на которой встречен вид. При этом учетная площадь в любом случае превышает суммарную площадь палеток, соответственно повышается и вероятность попадания в нее большего количества видов. На импактной территории лишайники населяют преимущественно основания стволов, в том числе участки между выступающими корнями, которые не попадают в сетку, но учитываются палеткой.

Обсуждая влияние на информативность индексов размера учитываемой площади, следует отметить, что при оценке покрытия 8 палетками, как было сделано в районе КМЗ, для видовой насыщенности не обнаружено значимого взаимодействия факторов “зона нагрузки × метод определения обилия” (см. табл. 3), т.е. метод оценки обилия не оказывает значимого влияния на получаемые результаты. В остальных районах, где покрытие учитывалось только двумя палетками на ствол, взаимодействие факторов значимо.

Помимо интегральных индексов состояния лишайникового покрова, важно сравнить “учи-

Таблица 3. Информативность индексов состояния сообществ эпифитных лишайников, базирующихся на определении встречаемости (f) и проективного покрытия (c)

Район	Индекс	F -отношение		Величина эффекта d	
		f	c	f	c
Карабаш ($df = 2$)	Видовая насыщенность	170.71	117.83	4.54	4.05
	Суммарное обилие	106.49	37.16	3.94	2.21
	Индекс Шеннона	236.64	141.91	7.99	5.06
	IAP	123.22	48.60	3.85	2.52
Кировград ($df = 2$)	Видовая насыщенность	128.58	45.50	2.80	1.97
	Суммарное обилие	190.32	93.02	5.02	2.41
	Индекс Шеннона	75.37	45.22	2.44	1.65
	IAP	206.31	104.60	4.46	2.41
Екатеринбург ($df = 1$)	Видовая насыщенность	105.65	83.73	2.37	2.24
	Суммарное обилие	53.20	30.07	2.04	1.76
	Индекс Шеннона	84.72	48.56	2.46	1.79
	IAP	99.00	60.14	2.18	1.99

Примечание. F -отношение рассчитано однофакторным ANOVA, все F значимы при $p \ll 0.001$; полужирным выделены варианты, при которых двухфакторный ANOVA показал значимое взаимодействие факторов “зона загрязнения \times метод оценки” ($p < 0.05$) или выявлены значимые различия величины эффекта (d).

Таблица 4. Зависимость встречаемости (f) или покрытия (c) видов лишайников от степени загрязнения (приведено F -отношение для однофакторного ANOVA)

Вид	Карабаш		Кировград		Екатеринбург	
	f	c	f	c	f	c
<i>Cladonia coniocraea</i>	74.16	59.18	12.05	29.22	8.57	10.73
<i>Evernia mesomorpha</i>	11.71	1.13	7.50	—	22.23	2.15
<i>Fuscidea pusilla</i>	6.37	5.28	9.70	—	1.00	—
<i>Hypocenomyce anthracophila</i>	—	—	—	—	44.91	9.33
<i>Hypocenomyce caradocensis</i>	0.62	2.30	7.61	1.39	93.66	47.89
<i>Hypogymnia physodes</i>	73.45	45.76	291.98	180.35	175.24	122.51
<i>Lecanora saligna</i>	39.43	34.24	—	—	1.00	1.00
<i>Lecidea cf. plebeja</i>	—	—	—	—	6.40	4.03
<i>Lepraria cf. elobata</i>	1.00	0.78	9.17	6.71	5.69	2.79
<i>Parmelia sulcata</i>	17.80	6.89	—	—	—	—
<i>Parmeliopsis ambigua</i>	0.78	4.16	17.50	1.61	—	—
<i>Rycnora sorophora</i>	—	—	—	—	18.28	10.76
<i>Scoliciosporum chlorococcum</i>	14.29	16.57	—	—	10.55	11.81
<i>Vulpicida pinastri</i>	55.38	30.43	4.16	5.21	—	—

Примечание. Включены виды, демонстрирующие значимую связь обилия со степенью нагрузки хотя бы в одном варианте; полужирным выделены статистически значимые величины ($p < 0.05$); прочерк означает, что вид не обнаружен в районе или данным методом учета.

тываемость” разными методами обилия отдельных видов лишайников. Из 48 видов, идентифицированных в трех районах исследования, только 14 показали значимую зависимость обилия от степени нагрузки хотя бы в одном из районов

(табл. 4), из них 3 (*Cladonia coniocraea*, *Evernia mesomorpha* и *Hypogymnia physodes*) — во всех трех районах, 4 — в двух районах (хотя бы одним методом оценки). Остальные виды обнаруживают значимую зависимость от степени загрязнения толь-

ко в одном из районов, и их состав отражает специфику лишайнофлоры конкретного форофита. Можно выделить группу видов, для которых наличие или отсутствие статистически значимой связи обилия с токсической нагрузкой не зависит от метода оценки обилия: если зависимость есть, то она выявляется при обоих методах оценки. К этой группе относятся виды-доминанты и другие виды с высокими значениями проективного покрытия — *C. coniocraea*, *H. physodes*, *Hypocenomyce anthracophila*, *Parmelia sulcata*, *Pycnora sorophora* и др. Однако существует и группа видов, которые обнаруживают связь со степенью нагрузки только при одном методе — учете встречаемости сеткой (*E. mesomorpha*, *Fuscidea pusilla*, *Hypocenomyce caradocensis* на пихте, *Parmeliopsis ambigua*).

Среди видов, для которых не обнаружена значимая зависимость обилия от степени нагрузки, основную часть составляют виды с низкой встречаемостью — высокочувствительный к загрязнению *Bryoria nadvornikiana*, факультативные эпифиты (*Cladonia digitata*, *Cl. fimbriata*, *Cl. macilenta*, *Placynthiella icmalea* и *P. uliginosa*, *Trapeliopsis flexuosa*), спорадически встречающиеся в районе исследования и/или на изучаемых форофитах виды (*Hypogymnia tubulosa*, *Hypocenomyce friesii*, *Phycia* spp., *Pycnora praestabilis*). В то же время к этой группе относятся и такие вполне обычные в районах исследования виды, как *Hypocenomyce scalaris*, *Chaenotheca ferruginea*, *Lecidella nylanderii* и *Micarea denigrata*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Индексы состояния лишайниковых сообществ, базирующиеся на двух разных методах оценки обилия — определения проективного покрытия с помощью палетки и встречаемости с помощью сетки — тесно коррелированы друг с другом и значимо связаны со степенью нагрузки; следовательно, их одинаково правомерно можно использовать в лишайноиндикационных работах. Однако индексы, базирующиеся на учете встречаемости сеткой (Herzig, Urech, 1991), более информативны и, следовательно, имеют более высокую разрешающую способность. Из-за большего охвата площади ствола сеткой учитывается большее количество видов по сравнению с палетками (по крайней мере на слабозагрязненной и незагрязненной территориях), что и обуславливает более высокую информативность показателей на основе встречаемости. Увеличение площади учета при оценке проективного покрытия путем использования большего количества палеток на стволе повышает информативность показателей на основе проективного покрытия.

Выявленные закономерности достаточно устойчивы, поскольку оказались справедливы для всех трех районов исследования, где изуча-

лись лишайниковые сообщества разных форофитов, при разном количестве и разных вариантах расположения пробных площадей.

Работа завершена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-04-06828) и Программы фундаментальных исследований Уро РАН (проект № 15-12-4-26).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Золотарев М.П., Бельская Е.А. Население беспозвоночных-герпетобионтов в крупном промышленном городе: разделение эффектов рекреации и урбанизации // Сиб. эколог. журн. 2015. № 1. С. 102–111.
- Бязров Л.Г. Эпифитные лишайниковые синузии в березовых лесах Восточноуральского радиоактивного следа // Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале. М.: Наука, 1993. С. 134–155.
- Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный мир, 2002. 336 с.
- Воробейчик Е.Л., Марин Ю.Ф., Жигальский О.А. и др. Перспективы использования Висимского заповедника для исследования антропогенных воздействий на наземные экосистемы // Проблемы заповедного дела. Екатеринбург, 1996. С. 19–23.
- Горшков В.В. Эпифитные лишайносинузии сосновых лесов Кольского полуострова (формирование, экология, влияние антропогенных факторов): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1986. 21 с.
- Комплексная экологическая оценка техногенного воздействия на экосистемы южной тайги / Под ред. Степанова А.М. М.: ЦЕПЛБ, 1992. 246 с.
- Мартин Л.Н. Лишеноиндикационное картирование г. Таллина // Лишеноиндикация состояния окружающей среды. Таллин, 1978. С. 134–139.
- Михайлова И.Н. Эпифитные лишайносинузии лесов Среднего Урала в условиях аэротехногенного загрязнения: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 1996. 24 с.
- Михайлова И.Н., Воробейчик Е.Л. Эпифитные лишайносинузии в условиях химического загрязнения: зависимости доза–эффект // Экология. 1995. № 6. С. 455–460. [Mikhailova I.N., Vorobeichik E.L. Epiphytic lichenosynusia under conditions of chemical pollution: dose-effect dependencies // Rus. J. of Ecology. 1995. V. 26. № 6. P. 425–431.]
- Пауков А.Г. Лишенофлора урбоэкосистем: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург: ИЭРиЖ Уро РАН, 2001. 18 с.
- Сморкалов И.А., Воробейчик Е.Л. Почвенное дыхание лесных экосистем в градиентах загрязнения среды выбросами металлургических заводов // Экология. 2011. № 6. С. 429–435. [Smorkalov I.A., Vorobeichik E.L. Soil Respiration of Forest Ecosystems in Gradients of Environmental Pollution by Emissions from Copper Smelters // Rus. J. of Ecology. 2011. V. 42. № 6. P. 429–435.]
- Сморкалов И.А., Воробейчик Е.Л. Влияние условий крупного промышленного города на почвенное дыхание лесных экосистем // Почвоведение. 2015. № 1. С. 118–126. [Smorkalov I.A., Vorobeichik E.L. The impact of a large industrial city on the soil respiration in forest eco-

- systems // Eurasian Soil Science. 2015. V. 48. № 1. P. 106–114.]
- Тарасова В.Н.* Эпифитный лишайниковый покров основных типов сосновых лесов Южной Карелии и его формирование: Автореф дис. ... канд. биол. наук. Санкт-Петербург: БИН им. В.Л. Комарова РАН, 2000. 27 с.
- Трасс Х.Х.* Анализ лишенофлоры Эстонии: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Л.: БИН АН СССР, 1968. 80 с.
- Ammann K., Herzig R., Liebendoerfer L., Urech M.* Multivariate correlation of deposition data of 8 different air pollutants to lichen data in a small town in Switzerland // Advances in Aerobiology. Birkhäuser: Basel, 1987. P. 401–406.
- Asta J., Erhardt W., Feretti M.* et al. Mapping lichen diversity as an indicator of environmental quality // Monitoring with lichens – Monitoring lichens. Nimis P.L., Scheidegger C., Wolseley P.A. Eds. Dordrecht–Boston–London: Kluwer Academic Publishers, 2002. P. 273–279.
- De Sloover J., LeBlanc F.* Mapping of atmospheric pollution on the basis of lichen sensitivity // Proceedings of the symposium in recent advances in tropical Ecology: International Soc. for tropical ecology. Misra R., Gopal B. Eds. Varansi, 1968. P. 42–56.
- Herzig R., Urech M.* Flechten als Bioindikatoren. Integriertes biologisches Messsystem der Luftverschmutzung für das Schweizer Mittelland // Bibliotheca Lichenologica. 1991. Bd 43. S.1–283.
- Kozlov M.V., Zvereva E.L., Zverev V.E.* Impact of Point Polluters on Terrestrial Biota. Comparative Analysis of 18 contaminated areas. Dordrecht etc.: Springer, 2009. 500 p.
- Leys C., Schumann S.* A nonparametric method to analyze interactions: The adjusted rank transform test // J. of Experimental Soc. Psychology. 2010. V. 46. № 4. P. 684–688.
- Lichens, Bryophytes and Air Quality.* Nash T., Wirth V. Eds. // Bibliotheca Lichenologica. 1988. V. 30. 297 p.
- Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens.* Nimis P.L., Scheidegger C., Wolseley P.A. Eds. Dordrecht–Boston–London: Kluwer Academic Publishers, 2002. 408 p.
- Nimis P.L., Castello M., Perotti M.* Lichens as Biomonitors of Sulphur Dioxide Pollution in La Spezia (Northern Italy) // Lichenologist. 1990. V. 22. P. 333–344.
- Purvis O.W., Chimonides P.J., Jones G.C.* et al. Lichen biomonitoring near Karabash Smelter Town, Ural Mountains, Russia, one of the most polluted areas in the world // Proc. R. Soc. Lond. Ser. B: Biol. Sci. 2004. V. 271. № 1536. P. 221–226.
- R Core Team.* R: A language and environment for statistical computing / R Foundation for Statistical Computing. 2014. URL: <http://www.R-project.org/>
- Scheidegger C., Mikhailova I.* Umweltforschung – Flechten als Bioindikatoren für die Luftverschmutzung im Ural: Eindrücke von einem gemeinsamen Forschungsprojekt // Naturwerte in Ost und West. Forschen für eine nachhaltige Entwicklung vom Alpenbogen bis zum Ural. Ed. Landolt R. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, 2000. S. 55–59.