УДК: 630*181

DOI: 10.58168/EnvPr2026_160-165

ЛИШАЙНИКИ КАК ИНДИКАТОРЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: ОБЗОР МЕТОДОВ

LICHENS AS INDICATORS OF AIR POLLUTION IN FOREST ECOSYSTEMS: A REVIEW OF METHODS

Потрашкова В.В., студентка 2 курса Лесного факультета, направление подготовки «Государственное управление лесами», ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», Воронеж, Россия

Potrashkova V.V., 2nd-year student of the Faculty of Forestry, majoring in "Public Forest Management", Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация: В статье представлен обзор методов лихеноиндикации, применяемых для оценки загрязнения атмосферного воздуха в лесных экосистемах. Рассматриваются биоэкологические особенности лишайников, обусловливающие их чувствительность к поллютантам. Анализируются основные методические подходы: метод проективного покрытия, шкалы чувствительности видов, индексы чистоты атмосферы и полеотолерантности. Обсуждаются требования к закладке пробных площадей и выбору модельных деревьев, а также ограничения метода. Особое внимание уделяется адаптации лихеноиндикационных методов для лесных экосистем, где традиционные подходы, разработанные для урбанизированных территорий, требуют модификации.

Abstract: The article provides an overview of lichenoindication methods used to assess atmospheric air pollution in forest ecosystems. The bioecological features of lichens that determine their sensitivity to pollutants are considered. The main methodological approaches are analyzed: the projective cover method, species sensitivity scales, atmospheric purity indices, and poleotolerance indices. Requirements for establishing sample plots and selecting model trees, as well as limitations of the method, are discussed. Special attention is paid to the adaptation of lichenoindication methods for forest ecosystems, where traditional approaches developed for urban areas require modification.

Ключевые слова: лихеноиндикация, биоиндикация, лишайники, загрязнение воздуха, лесные экосистемы, эпифитные лишайники, индекс чистоты атмосферы, мониторинг, диоксид серы.

Keywords: lichenoindication, bioindication, lichens, air pollution, forest ecosystems, epiphytic lichens, atmospheric purity index, monitoring, sulfur dioxide.

Чувствительность лишайников к загрязнению воздуха обусловлена особенностями их морфологии и физиологии. Лишайник представляет собой симбиотический организм, состоящий из гриба (микобионта) и водоросли (фикобионта). Отсутствие корневой системы и кутикулы, характерной для высших растений, приводит к тому, что лишайники поглощают влагу и питательные вещества - а вместе с ними и загрязнители - всей поверхностью таллома непосредственно из атмосферы [2].

© Потрашкова В. В., 2026

Разные виды лишайников обладают неодинаковой устойчивостью к загрязнению. Общая закономерность такова: наиболее чувствительными являются кустистые лишайники, средней устойчивостью обладают листоватые, а наиболее толерантными - накипные [2]. Эта закономерность была подмечена уже в первых лихеноиндикационных исследованиях и легла в основу многих методик. Так, виды рода Usnea, имеющие кустистый таллом, исчезают при малейшем загрязнении и служат индикаторами очень чистого воздуха. Листоватые лишайники, такие как пармелия (Parmelia sulcata), могут встречаться в условиях умеренного загрязнения, а накипные лишайники (например, Lecanora, Phisica) способны выживать даже в городских условиях.

Летальная концентрация диоксида серы для большинства лишайников составляет в среднем около 0,5 мг/м³, тогда как при концентрации 0,08–0,10 мг/м³ они нормально растут и развиваются [2]. Таким образом, даже незначительное присутствие SO_2 в воздухе хорошо диагностируется лишайниками. Как отмечают исследователи, главным фактором, лимитирующим распространение лишайников, является именно диоксид серы, а также оксиды азота и другие поллютанты [5].

Для лихеноиндикации важно также учитывать микроклиматические условия. Лишайники предпочитают влажные местообитания, поэтому в лесу их встречаемость выше, чем в открытых ландшафтах. При сравнении разных участков лесных экосистем необходимо выбирать деревья одной породы, примерно одного возраста и сходных условий увлажнения и освещённости, чтобы минимизировать влияние этих факторов на результаты оценки загрязнения [7].

Основным методом пассивной лихеноиндикации является измерение проективного покрытия лишайников на стволах деревьев [4]. Под проективным покрытием понимается доля поверхности ствола (обычно на определённой высоте), занятая лишайниками. Этот метод позволяет оценить как общую численность лишайников на исследуемой территории, так и встречаемость отдельных видов.

Наиболее распространённым инструментом измерения служит палетка - прозрачная пластина размером 10×10 см, разделённая на 100 квадратов. Палетку плотно прикладывают к стволу дерева на высоте приблизительно 1-1,5 м от земли. Для каждого квадрата визуально оценивают, покрыт ли он лишайниками полностью, частично или не покрыт вовсе [4].

Для получения статистически достоверных данных на каждой пробной площади обследуют не менее 10 модельных деревьев одной породы и примерно одного возраста [4]. На каждом дереве измерения проводят с четырёх сторон света (север, юг, запад, восток) или только с северной стороны, где лишайники обычно развиты лучше из-за более высокой влажности.

Альтернативой палетке служит метод линейных пересечений, при котором на ствол накладывают гибкую линейку и фиксируют, на каком протяжении она пересекает талломы лишайников. Этот метод менее трудоёмок, но даёт менее точные результаты при оценке покрытия мелкими накипными лишайниками [7].

Для количественной оценки степени загрязнения воздуха разработаны различные индексы, наиболее известный из которых - индекс чистоты атмосферы (Index of Atmospheric Purity, IAP). В разных модификациях он рассчитывается как сумма произведений частоты встречаемости вида и его коэффициента полеотолерантности (устойчивости к загрязнению) [3].

Коэффициент полеотолерантности каждому виду лишайников присваивается на основе его известной чувствительности к загрязнению: от 1 (наиболее чувствительные, встречаются только в очень чистых условиях) до 5 или более (наиболее устойчивые). Чем выше значение IAP, тем чище воздух на исследуемой территории [3].

Однако применение традиционного IAP в лесных экосистемах имеет ограничения. Как отмечают исследователи, шкалы полеотолерантности разработаны преимущественно для европейских видов лишайников в условиях урбанизированных территорий. В лесных экосистемах, особенно в удалённых регионах, видовой состав лишайников может существенно отличаться, и готовые коэффициенты полеотолерантности не всегда применимы [1]. Поэтому при лихеноиндикации в лесах чаще используют модифицированные подходы, основанные на сравнении проективного покрытия и видового разнообразия между разными участками вдоль градиента загрязнения.

Более простой и доступный метод - визуальная оценка зон загрязнения по шкале, учитывающей встречаемость разных жизненных форм лишайников. Эта шкала включает пять зон - от наиболее загрязнённой (полное отсутствие лишайников) до условно чистой (присутствие кустистых лишайников) [6]. Для лесных экосистем такая шкала удобна тем, что не требует идентификации видов до уровня вида - достаточно различать три морфологические группы: накипные, листоватые и кустистые.

При организации лихеноиндикационных исследований в лесах необходимо соблюдать ряд методических требований [7]:

1. Пробные площади должны закладываться в гомогенных по составу и возрасту фитоценозах. В идеале - в монопородных одновозрастных насаждениях. Это позволяет минимизировать влияние состава древостоя на лихенофлору.

2. Биотические и абиотические условия на сравниваемых пробных площадках должны быть максимально сходными: состав и структура древостоя, форма рельефа, увлажнение, освещённость.

3. Модельные деревья должны быть без видимых повреждений, примерно одного возраста и диаметра, принадлежать к одной из основных лесообразующих пород. Предпочтительнее использовать лиственные породы (берёза, осина, дуб), так как кора хвойных имеет кислую реакцию, что влияет на состав лихенобиоты.

4. При разовых ("одноразовых") исследованиях количество пробных площадей должно составлять не менее 5-10 (в зависимости от задач), а число модельных деревьев на каждой площади - не менее 10 [4].

В лесных экосистемах важным дополнительным фактором является экспозиция склона и положение в рельефе. В низинах и долинах рек, где застаивается холодный влажный воздух, лишайники развиваются лучше, но при этом здесь же могут накапливаться и тяжёлые загрязнители, переносимые с воздушными массами. Эти особенности необходимо учитывать при интерпретации результатов [1].

Лихеноиндикация имеет ряд ограничений. Главное из них заключается в том, что метод позволяет оценить общий уровень загрязнения, но не идентифицировать конкретные загрязняющие вещества [2]. Лишайники реагируют на комплекс поллютантов, причём разные загрязнители могут вызывать сходные эффекты. Кроме того, на состояние лихенобиоты влияют не только загрязнение, но и естественные экологические факторы - влажность, освещённость, кислотность коры, конкуренция с другими эпифитами. Отделение антропогенного воздействия от природной изменчивости - одна из главных методических сложностей при работе в лесных экосистемах [5].

Другая проблема - медленный рост лишайников, из-за чего их реакция на изменение уровня загрязнения проявляется с запаздыванием в несколько лет [3]. Это затрудняет использование лихеноиндикации для оперативного мониторинга, но делает её незаменимой для оценки долгосрочных тенденций.

В лесных экосистемах дополнительным ограничением выступает высокая пространственная неоднородность распределения эпифитных лишайников, связанная с различиями в освещённости, влажности и составе древостоя. Для получения репрезентативных данных требуется значительное количество модельных деревьев и пробных площадей [7].

Традиционные лихеноиндикационные методы разрабатывались преимущественно для урбанизированных территорий и открытых ландшафтов. Применение их в лесных экосистемах требует специальной адаптации. Как отмечается в специальной литературе, для лесов характерно большее видовое разнообразие эпифитных лишайников, а также наличие специфических микроместообитаний (основания стволов, ветви, мёртвая древесина), которые не учитываются при стандартных подходах [1].

Одним из способов адаптации является использование не всего видового состава лишайников, а небольшой группы видов-индикаторов, наиболее чувствительных к загрязнению и одновременно широко распространённых в лесных экосистемах. В качестве таких видов для средней полосы России могут выступать представители родов Usnea, Evernia, Hypogymnia [6].

Другой подход - интеграция лихеноиндикации в системы долгосрочного мониторинга на постоянных пробных площадях. При регулярных повторных наблюдениях на одних и тех же деревьях влияние природных факторов нивелируется, и изменения в проективном покрытии лишайников могут быть с большой достоверностью отнесены к антропогенному воздействию [5].

Список литературы

1. Frati L., Brunialti G. Lichen-Based Biomonitoring of Air Pollution in Forest Ecosystems: A Critical Review // Forests. 2023. Vol. 14. № 3. P. 24-32.

2. Лыгин С.А., Ваниева А.С. Оценка загрязнения воздуха методом лихеноиндикации // Вестник экологии и природопользования. 2021. № 4. С. 42-48.

3. Захарова Н.Ю., Кузнецова И.С., Кропова Ю.Г. Биоиндикация загрязнения воздуха методом лихеноиндикации // Вестник МГПУ. Естественные науки. 2024. № 2 (54). С. 35-44.

4. Никонова Н.Н., Шуклина А.С. Методика лихеноиндикационных исследований в лесных экосистемах // Экологический мониторинг и биоиндикация. 2022. № 1. С. 7-14.

5. Nimis P.L., Scheidegger C., Wolseley P.A. Monitoring with Lichens — Monitoring Lichens. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. 408 с.

6. Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный мир, 2002. 336 с.

7. Инсарова И.Д., Инсаров Г.Э. Лишайники — индикаторы загрязнения атмосферного воздуха // Экология. 1989. № 2. С. 14-29.

References

1. Frati L., Brunialti G. Lichen-Based Biomonitoring of Air Pollution in Forest Ecosystems: A Critical Review // Forests. 2023. Vol. 14. No. 3. P. 24–32.

2. Lygin S.A., Vanieva A.S. Assessment of Air Pollution Using the Lichen Indication Method // Bulletin of Ecology and Nature Management. 2021. No. 4. P. 42–48.

3. Zakharova N.Y., Kuznetsova I.S., Kropova Y.G. Bioindication of Air Pollution Using the Lichen Indication Method // Bulletin of Moscow State Pedagogical University. Natural Sciences. 2024. No. 2 (54). P. 35–44.

4. Nikonova N.N., Shuklina A.S. Methodology of Lichen Indication Studies in Forest Ecosystems // Environmental Monitoring and Bioindication. 2022. No. 1. P. 7–14.

5. Nimis P.L., Scheidegger C., Wolseley P.A. Monitoring with Lichens — Monitoring Lichens. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. 408 p.

6. Byazrov L.G. Lichens in Environmental Monitoring. Moscow: Nauchny Mir, 2002. 336 p.

7. Insarova I.D., Insarov G.E. Lichens as Indicators of Atmospheric Air Pollution // Ecology. 1989. No. 2. P. 14–29.