

УДК 502.2

ББК 20.18

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-1-77-81>

Оценка уровня загрязнения окружающей среды в прибрежных зонах северных территорий с использованием лишайников в качестве биоиндикаторов

Загитова Г.Т.✉, Горшков В.В.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова», Санкт-Петербург, Россия

✉ Zagitova98@bk.ru

Аннотация. Экосистемы прибрежных зон севера характеризуются низкой устойчивостью к загрязнениям окружающей среды. Помимо физико-химических методов оценки уровня загрязнения окружающей среды наибольшую популярность в настоящий момент набирают биологические методы оценки, к которым относится, в частности, метод лишайноиндикации. Лихенофлора устойчива к любым климатическим изменениям, включая экстремально низкие температуры северных территорий. Также сообщества лишайников незамедлительно реагируют на любые биохимические, геохимические и другие изменения, вызванные как естественными факторами, так и антропогенными, в природных компонентах. Лишайники активно накапливают в своих талломах тяжелые металлы и другие загрязняющие вещества, что создает возможности для научных исследований. В статье описана методика биоиндикации загрязнения окружающей среды с участием лишайнофлоры, а также указаны критерии оценки, используемые при лишайноиндикации, и акцентирована важность необходимости мониторинга состояния экосистем прибрежных территорий северных зон с использованием лишайноиндикации.

Ключевые слова: лишайники, северные территории, биоиндикация, экосистемы, арктические зоны, антропогенное загрязнение, лишайнобиота

Конфликт интересов: авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Загитова Г.Т., Горшков В.В. Оценка уровня загрязнения окружающей среды в прибрежных зонах северных территорий с использованием лишайников в качестве биоиндикаторов. *Арктика и инновации*. 2025;3(1):77–81. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-1-77-81>

Assessment of environmental pollution in coastal areas of northern seas using lichens as bioindicators

Gulnaz T. Zagitova✉, Vadim V. Gorshkov

Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Saint Petersburg, Russia

✉ Zagitova98@bk.ru

Abstract. Ecosystems in northern coastal areas are highly susceptible to environmental pollution. Its levels can be assessed using physical and chemical methods. In recent years, biological methods are also attracting increased attention, in particular those using lichens as bioindicators. Lichen flora is resistant to any climatic changes, including extremely low temperatures of northern areas. In addition, lichen communities immediately respond to any biochemical, geochemical, etc., changes caused both by natural and anthropogenic factors. Lichens actively accumulate heavy metals and other pollutants in their thalli, thus enabling scientific research. In this article, we describe a methodology for bioindication of environmental pollution using lichen flora. Assessment criteria for lichen bioindication are provided. The importance of monitoring the state of ecosystems in the coastal areas of northern seas using lichens as bioindicators is emphasized.

Keywords: lichens, northern areas, bioindication, ecosystems, Arctic zones, anthropogenic pollution, lichen biota

Conflict of interest: the authors report no conflict of interest.

For citation: Zagitova G.T., Gorshkov V.V. Assessment of environmental pollution in coastal areas of northern seas using lichens as bioindicators. *Arctic and Innovation*. 2025;3(1):77–81. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-1-77-81>

Экосистемы северных регионов сталкиваются с серьезными угрозами из-за изменения климата и антропогенной деятельности. Опасность загрязнений в Арктическом регионе по сравнению с другими регионами повышена, так как скорость самоочищения акваторий зависит от ряда физико-химических и биологических факторов. Низкие температуры и короткий вегетационный период замедляют процессы разложения и самоочищения, что делает эти экосистемы более уязвимыми к загрязнению. Загрязнители, такие как тяжелые металлы и органические соединения, могут накапливаться в окружающей среде и оказывать длительное воздействие на экосистему. Кроме того, изменения климата могут повлиять на миграцию животных, распределение видов и их взаимодействие, что, в свою очередь, может изменить структуру экосистем. Поэтому крайне важно принимать меры для защиты этих уникальных природных систем и снижения негативного воздействия человеческой деятельности [3].

В настоящее время для оценки уровня загрязнения окружающей среды используются физико-химические методы, которые чаще всего применяются в мониторинге, а также биологические методы. Физико-химические методы основываются на выполнении аналитических реакций, результаты которых фиксируются с использованием различных приборов. Эти методы позволяют устанавливать сверхмалое содержание (до 10^{-12}) [9] компонентов и веществ в анализируемых объектах, также обеспечивают возможность быстрого проведения анализа, при этом сам

процесс анализа обычно автоматизирован. Биологические методы базируются на установлении видового состава, показателях жизненного состояния живых организмов и особенностей их распространения.

Одним из направлений биоиндикации является лишеноиндикация, использующая лишенобиоту, их виды и группировки для оценки качества окружающей среды.

Лишеноиндикация представляет собой совокупность методов, которые используют лишенофлору для оценки общего уровня содержания основных поллютантов в окружающей среде. Как и другие методы биоиндикации, лишеноиндикация основывается на принципе экологической индивидуальности видов, что означает, что разные виды реагируют по-разному на определенные внешние факторы [6].

В рамках изучения влияния аэротехногенного загрязнения на лишайники в естественной среде ключевой задачей является установление взаимосвязей между различными характеристиками лишайникового покрова. К таким характеристикам относятся количество видов, присутствие или степень покрытия определенных видов, общее проективное покрытие лишайников, а также синтетические индексы, отражающие состояние лишайниковой растительности. Эти характеристики сопоставляются с параметрами, которые указывают на уровень загрязнения как в региональном, так и в локальном масштабе [8].

Методики мониторинга с использованием лишайников ландшафтов разработаны в конце 80-х годов XX века и успешно апробированы в естественных и техногенных ландшафтах Прибалтики и европейской части России [4]. Наблюдение за состоянием лишайников в качестве биоиндикаторов загрязнения показывает значительно более высокую эффективность по сравнению с классическими методами. Анализ лишайникового покрова позволяет оценить среднегодовое качество загрязнения атмосферного воздуха.

Загрязняющие вещества в атмосферном воздухе доходят до лишайникового покрова как в состоянии осадков, так и в качестве аэрозолей или пыли. Осаждение крупных загрязняющих аэрозолей и их интеграция в слоевища лишайников хорошо иллюстрируются при сопоставлении химических профилей, полученных с помощью рентгеновской дифракции, для атмосферных аэрозолей, собранных непосредственно из воздуха, и частиц, зафиксированных лишайниками [7].

Ханс Хатмутович Трасс (1983) разделил методы лишайноиндикации на три группы: методы, основанные на изучении изменений, происходящих в лишайниках под влиянием загрязнений; методы, основанные на изучении изменений видового состава лишайников, происходящих под влиянием загрязнений; методы изучения лишайниковых сообществ в загрязненных районах и составление специальных карт.

В рамках применения методов первой группы выбирается индикаторный вид, который обладает высокой чувствительностью к определенному загрязнению, и анализируются такие характеристики, как кислотность и электропроводимость водной вытяжки из коры, уровень хлорофилла в лишайниковых водорослях, а также содержание серы, железа, ртути, кадмия и прочих поллютантов в слоевище лишайника и т. д. [2].

Наиболее распространенными видами лишайников, применяемыми в лишайноиндикации, являются *Hypogymnia physodes* (L.), *Xanthoria parietina* (L.), *Lecanora conizaeoides*, *Scoliosporum chlorococcum* и видов родов *Bryoria* и *Usnea*.

В настоящее время для оценки загрязнения атмосферного воздуха широко применяется

индекс полеотолерантности (ИП). К его основным компонентам относятся общее проективное покрытие, класс полеотолерантности определенного вида и проективное покрытие данного вида [2]. Расчет индекса представлен в формуле:

$$\text{ИП} = \sum_{i=1}^n \frac{c_i a_i}{c_n}$$

где c_n — общее проективное покрытие;
 a_i — класс полеотолерантности вида, определяемый для каждого индикаторного вида лишайника;
 c_i — проективное покрытие вида.

Учитывая значительное развитие промышленности в Арктическом регионе, необходимо внедрять систематический экологический мониторинг для оценки воздействия антропогенных факторов на экосистемы.

Главная задача исследований лишайникового покрова в Арктическом регионе — проведение инвентаризации лишайнобиоты, а также исследование отдельных систематических групп.

Изучение лишайнобиоты Русской Арктики началось 200 лет назад. За эти годы было опубликовано свыше 300 лишайнологических и геоботанических работ. Первые упоминания о лишайниках Русской Арктики встречаются еще в работах П.С. Палласа. В начале и середине XIX века появились публикации с упоминанием немногих, наиболее распространенных видов. В настоящее время для Русской Арктики известно более 1000 таксонов (1078 видов, 7 подвидов и 17 разновидностей) лишайников, относящихся к 192 родам и 69 семействам [5].

На сегодня в лишайноиндикации распространены по большей части эпифитные лишайники [5].

Однако существуют методы применения лишайников в качестве биоиндикаторов на прибрежных территориях с целью оценки антропогенного воздействия на водные экосистемы.

А.В. Сони́на из Петрозаводского государственного университета предложила идею о том, что эпифитный прибрежный лишайниковый покров, который произрастает на границе между сушей и водоемом, может быть

использован для оценки состояния прибрежной водной среды, в частности для изучения реакции наземной биоты на изменения в качестве воды [1].

Исследование выполнено на территории Республики Карелия на побережье Онежского озера, Ладожского озера, р. Лососинка, Суна с различными уровнями антропогенной нагрузки на природную среду.

Лишениобиота обследованных побережий пресных водоемов насчитывает 53 вида. При этом наибольшим видовым разнообразием лишайников характеризуются места без очевидных источников загрязнения — особо охраняемая природная территория «Кивач» (29 видов), побережье Ладожского озера (27 видов) и Ботанический сад ПетрГУ (16 видов), в то время как в условиях города (Петрозаводск), крупного поселка (Янишполе) и близ крупного производства (г. Кондопога) число видов лишайников значительно меньше (4, 5 и 8 соответственно) [1].

Анализ общих характеристик лишайникового покрова (число видов лишайников в опи-

сании и общее покрытие видов) по всем точкам исследования показал, что наиболее чутко реагирует на химические показатели воды число видов лишайников в описании. При увеличении в водоеме соединений фосфора снижается биоразнообразие эпилитного лишайникового покрова, а при повышении азотистых соединений в окружающей среде наблюдается снижение уровня общего покрытия лишайников.

Состояние эпилитного лишайникового покрова на прибрежной территории может быть использовано в качестве показателя степени загрязнения водоема, которое возникает в результате сброса сточных вод, включая отходы промышленного, бытового и сельскохозяйственного происхождения [1].

На сегодня имеется лишь небольшое количество исследований, которые рассматривают использование эпилитных лишайников в качестве биоиндикаторов для оценки состояния окружающей среды в прибрежных зонах водоемов. Это указывает на необходимость более глубокого изучения их возможностей в экосистемном мониторинге.

Литература

1. Сони́на А.В. Эпилитный лишайниковый покров в оценке качества прибрежно-водной среды в условиях Карелии. Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2021;(20-1):409–413.
2. Трасс Х.Х. Криптоиндикационные методы определения степени загрязненности атмосферного воздуха и экологический мониторинг. В: Охраняемые природные территории Советского Союза, их задачи и некоторые итоги исследования. Москва: Наука; 1983, с. 130–139.
3. Алексеев Д.К. Экологический мониторинг континентального шельфа арктических морей России: выбор критериев, оценка и перспективы. Арктика и инновации. 2023;1(1):51–58. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2023-1-1-51-58>
4. Галанин А.А., Глушкова О.Ю. Лишениометрия. Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. 2003;(33):22–52.
5. Андреев М.П., Котлов Ю.В., Макарова И.И. Биологическое разнообразие лишайников Русской Арктики (таксономический состав и предварительный анализ). Новости систематики низших растений. 1996;(31):82–94.
6. Чеснокова С.М. Лишениоиндикация загрязнения окружающей среды: практикум. Владимир: Владим. гос. ун-т; 1999.
7. Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. Москва: Научный мир; 2002.
8. Горшков В.В. Использование эпифитных лишайников для индикации атмосферного загрязнения. Апатиты; 1991.
9. Lan X., Thoning K.W., Dlugokencky E.J. Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2025-01; 2022. <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>.

References

1. Sonina A.V. Epilithic lichen cover in assessing the quality of the coastal aquatic environment in Karelia. Problems of botany of Southern Siberia and Mongolia. 2021;(20-1):409–413. (In Russ.).
2. Trass H.H. Cryptindication methods for determining the degree of air pollution and environmental monitoring. In: Protected natural territories of the Soviet Union, their tasks and some results of the study. Moscow: Nauka Publ.; 1983, pp. 130–139. (In Russ.).
3. Alekseev D.K. Ecological monitoring of the Russian continental shelf of Arctic seas: criterion selection, assessment, and prospects. Arctic and Innovations. 2023;1(1):51–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2023-1-1-51-58>
4. Galanin A.A., Glushkova O.Yu. Lichenometry. Russian Foundation for Basic Research Journal. 2003;(3(33)):22–52. (In Russ.).
5. Andreev M.P., Kotlov Yu.V., Makarova I.I. Biological diversity of lichens of the Russian Arctic (taxonomic composition and preliminary analysis). Novitates Systematicae Plantarum non Vascularium. 1996;(31):82–94. (In Russ.).
6. Chesnokova S.M. Lichen indication of environmental pollution: Workshop. Vladimir: Vladimir State University; 1999. (In Russ.).
7. Byazrov L.G., Severtsov A.N. Lichens in environmental monitoring. Moscow: Nauchny Mir Publ.; 2002. (In Russ.).
8. Gorshkov V.V. Use of epiphytic lichens for indication of atmospheric pollution. Apatity; 1991. (In Russ.).
9. Lan X., Thoning K.W., Dlugokencky E.J. Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2025-01; 2022. <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>

Сведения об авторах

Загитова Гульназ Тимуровна — аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова», 194021, Санкт-Петербург, Институтский переулок, д. 5, литер У
e-mail: zagitova98@bk.ru

Горшков Вадим Викторович — доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова», 194021, Санкт-Петербург, Институтский переулок, д. 5, литер У
e-mail: vadim-v-gorshkov@yandex.ru

Information about the authors

Gulnaz T. Zagitova — Postgraduate Researcher, Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov, 194021, Saint Petersburg, Institutsky Pereulok, 5, liter U
e-mail: zagitova98@bk.ru

Vadim V. Gorshkov — Dr. Sci. (Biology), Prof., Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov, 194021, Saint Petersburg, Institutsky Pereulok, 5, liter U
e-mail: vadim-v-gorshkov@yandex.ru

Вклад авторов

Загитова Гульназ Тимуровна — сбор и анализ материалов, подготовка статьи к публикации, оформление библиографического списка.

Горшков Вадим Викторович — редактирование и окончательная доработка статьи с целью повышения ее научной значимости.

Authors' contribution

Gulnaz T. Zagitova — collection and analysis of materials, manuscript preparation, bibliography formatting.

Vadim V. Gorshkov — editing and final revision of the manuscript with the introduction of valuable intellectual content.