

УДК 581.5: 581.192

ВЛИЯНИЕ СТРЕССОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ЛИШАЙНИКОВ РОДА CLADONIA ЕВРОАРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

¹Бровко О.С., ¹Паламарчук И.А., ¹Слобода А.А., ¹Бойцова Т.А.,
^{1,2}Гагушкина А.А., ¹Вальчук Н.А.

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
Российской академии наук, Архангельск, e-mail: sloboda.iepn@yandex.ru;

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск

Лишайники часто выступают организмами-индикаторами для установления негативных изменений в окружающей среде. Наименее изученным в плане лишенологических и лишеноиндикационных исследований является Евроарктический регион России. В статье обсуждаются особенности накопления пигментов, фенольных соединений, специфических лишайниковых кислот, а также микро- и макроэлементов в лишайниках рода *Cladonia* (Hill Ex P. Browne), произрастающих в различных эколого-географических условиях на территории Архангельской области и Республики Карелия. Обнаружена взаимосвязь накопления этих веществ в талломах лишайников с природными и антропогенными факторами в местах их произрастания. Показано, что действие антропогенной нагрузки на лишайники нарушает естественный ход течения метаболизма, приспособленный к климатическим условиям данного региона. Проведенные исследования значимы для ранней диагностики техногенного загрязнения экосистем и состояния природной среды региона в целом.

Ключевые слова: Евроарктический регион, лишайник, первичные и вторичные метаболиты, абиотические факторы, техногенная нагрузка

THE INFLUENCE OF STRESS FACTORS ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF LICHENS GENUS CLADONIA OF EURO-ARCTIC REGION

¹Brovko O.S., ¹Palamarchuk I.A., ¹Sloboda A.A., ¹Boytsova T.A.,
²Gagushkina A.A., ¹Valchuk N.A.

¹Federal Center for Intergrated Arctic Researches, Russian Academy of Sciences,
Arkhangelsk, e-mail: sloboda.iepn@yandex.ru;

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk

Lichens are widely used as indicator organism for the establishment of negative changes in the environment. The Euro-Arctic region of Russia is the least studied in terms of lichenological and lichen indication studies. The article discusses the features of the accumulation of pigments, phenolic compounds, specific lichen acids, as well as micro and macro elements in lichen genus *Cladonia* (Hill Ex P. Browne), growing in different ecological and geographical conditions in the Arkhangelsk Region and the Republic of Karelia. The linkages between the accumulation of these substances in the lichen thalli and the natural and anthropogenic factors in the places where they grow are established. It is shown that the influence of the anthropogenic impact on lichens violates the natural course of metabolic processes adapted to the climatic conditions of this region. The conducted researches are important for early diagnosis of technogenic pollution of ecosystems and the natural environment of the region as a whole.

Keywords: Euro-Arctic Region, lichen, primary and secondary metabolites, abiotic factors, technogenic load

Расположение Евроарктического региона между океаном и территорией, характеризующейся континентальным климатом, является причиной интенсивной циклонической активности с резкими перепадами атмосферного давления и частой сменой погоды. Наличие большого количества уникальных природных ландшафтов, имеющих статус особо охраняемых территорий, накладывает определенные ограничения на хозяйственную деятельность по освоению минерально-сырьевых ресурсов, значимость которых для экономики региона в ближайшие годы будет возрастать. Предстоящее интенсивное освоение ресурсов недр региона будет неизбежно сопрово-

ждаться возрастающим техногенным воздействием на окружающую среду [3]. Поэтому весьма актуальной представляется разработка ряда мероприятий по экологической оценке состояния территории региона в условиях высокой чувствительности северных экосистем. В свою очередь, это невозможно без существования мониторинговых исследований, среди которых одним из наиболее перспективных является метод биоиндикации. Многие ученые считают, что для роли биоиндикаторов больше всего подходят лишайники, так как они проявляют высокую чувствительность к изменениям химического состава компонентов окружающей среды [5, 1]. Питание лишайников

зависит от элементного состава воздуха и атмосферных осадков. На компонентный состав лишайников большое влияние оказывают климатические факторы – свет, влажность, температура [4].

Цель настоящей работы – изучить влияние экологических факторов (климато-географические, техногенные) на изменения метаболического состояния и накопление микро- и макроэлементов в слоевищах лишайников Евроарктического региона.

Материалы и методы исследования

Отбор проб эпигейных лишайников рода *Cladonia* осуществлялся в октябре 2015 г. на территории Онежского (Архангельская область) и Кемского (Республика Карелия) районов на 4 пробных участках (рис. 1, точки 1 – 4):

Точка 3. Архангельская область, Онежский район, лесная зона, расположенная в 4 км от пос. Порог, тип леса – ельник зеленомошно-лишайниковый, в древостое велико участие сосны (25%), сомкнутость древостоя – 0,5–0,6, подлесок представлен единичными кустами можжевельника, травяно-кустарничковый ярус незначителен и представлен черникой, сплошной мохово-лишайниковый напочвенный покров, почва сухая песчаная.

Точка 4. Республика Карелия, Кемский район, о. Русский Кузов, тип леса – сосняк чернично-лишайниковый, сомкнутость древостоя – 0,1–0,15, сплошной покров из кустистых лишайников с редкими кустами брусники, почва сухая песчаная.

Пробы лишайников отбирались весом 100–150 г на пяти равноудаленных точках участка. Виды лишайников были установлены с использованием определителя [6]. Установлено, что на всех четырех участках произрастают лишайники *Cladonia rangiferina* (L.) Weber ex F.H. Wigg и *Cladonia sylvatica* (Wallr.).

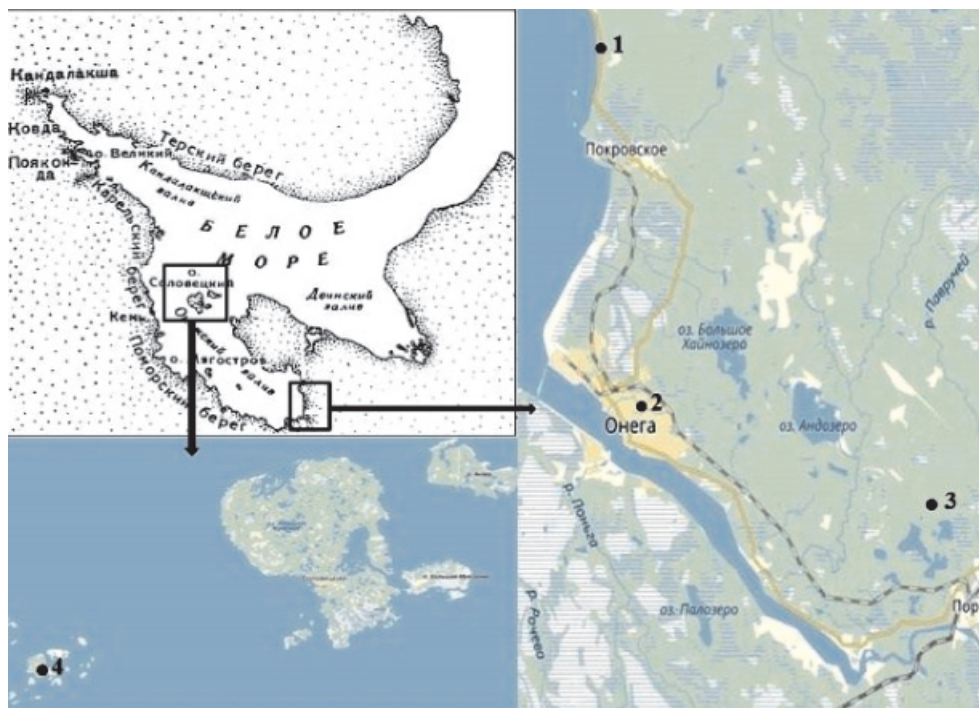


Рис. 1. Карта с точками отбора проб лишайников

Точка 1. Архангельская область, Онежский район, окрестности с. Покровское, тип леса – сосняк чернично-лишайниковый, в древостое отмечена примесь ели (5%), сомкнутость древостоя – 0,2–0,25, сплошной покров из кустистых лишайников с редкими кустиками брусники, почва сухая песчаная. В 100 м к юго-востоку от этой точки расположена автодорога «Архангельск – Северодвинск – Онега», а в 120 м к северо-западу находится Онежский залив Белого моря.

Точка 2. Архангельская область, Онежский район, лесная зона, расположенная в 15 м от автодороги «Архангельск – Северодвинск – Онега», тип леса – сосняк чернично-лишайниковый, сомкнутость древостоя – 0,6–0,75, сплошной покров из кустистых лишайников с редкими кустиками брусники, почва сухая песчаная.

Образцы лишайников были очищены с помощью пинцета от посторонних загрязнителей (мхов, хвои и пр.) и высушены до воздушно-сухого состояния. Для анализов отбирали необходимое количество неповрежденных и крупных талломов и обмывали их деионизированной водой для удаления с поверхности пылевидных частиц. Реакцию организмов на стрессовые воздействия характеризовали по показателям пигментной системы, содержанию фенольных соединений, лишайниковых кислот и химических элементов.

Определение зольности измельченных образцов лишайников проводили в муфельной печи при температуре 500°C согласно ГОСТ 27784–88 [2]. Содержание лишайниковых кислот (усниновой кислоты и атранорина) в талломах определяли на жидкостном

квадрупольном хромато-масс-спектрометре LCMS-2020 (Shimadzu, Япония) согласно [7]. Экстракцию фенольных соединений из талломов лишайников осуществляли 95%-ным этиловым спиртом, общее их содержание определяли спектрофотометрически по методу Свейна – Хиллиса с реактивом Фолина – Чокальтеу на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония) при длине волны 730 нм в кюветах с толщиной слоя 10 мм согласно [9]. Расчет общего содержания фенолов проводили по калибровочному графику, построенному по п-оксибензойной кислоте. Пигменты экстрагировали 80%-ным ацетоном, их содержание определяли на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония) по общепринятой методике [8]. Для количественного определения металлов в лишайниках использовали волнодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр XRF-1800 (Shimadzu, Япония), для определения углерода, азота и серы – анализатор EuroEA 3000 (EuroVector, Италия).

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что зольность исследуемых образцов лишайников (табл. 1) имеет четкую зависимость от видовой принадлежности и условий произрастания:

– при одинаковых условиях произрастания лишайник *C. sylvatica* имеет большую зольность таллома в сравнении с лишайником *C. rangiferina*. Это может быть связано с разной скоростью протекания метаболических процессов в клетках и потребностью в питательных элементах для лишайников различной видовой принадлежности

– высокая зольность талломов лишайников в т. 1 и 2 может быть связана с условиями их произрастания: высокая освещенность и влажность лесной подстилки, способствующие наращиванию биомассы, а также близость автомобильной дороги и населенных пунктов, являющихся источниками пылевых выбросов. Для лишайников в т. 3 и 4 невысокая зольность обусловлена климатическими условиями – единственно значимым фактором окружающей среды, формирующим уровень их фитомассы.

Лишайники представляют собой ассоциации грибов (микобионты), которые получают углерод и азот от своих водорослевых и/или цианобактериальных симбионтов (фотобионты). Фотобионт лишайников рода *Cladonia* – зеленые водоросли рода *Trebouxia*, снабжение азотом которых происходит за счет поступления неорганических и органических соединений азота на поверхность талломов в форме различных жидких и сухих осадений. Содержание азота и серы в талломах зависит от видовой принадлежности и условий произрастания лишайников. Для лишайников, произрастающих в т. 3 и 4, основным источником азота служат атмосферные осадки. Дополнительным источником поступления соединений азота и серы для лишайников в т. 1 и 2 могут служить выхлопные газы двигателей автомобилей и выбросы дымовых труб жилых помещений и котельных (табл. 1).

Известно, что у растений губительный эффект загрязнителей проявляется прежде всего в изменении хлоропластов. Основным структурным компонентом мембраны хлоропластов являются пигменты – хлорофиллы *a* и *b*, каротиноиды (табл. 2). Поскольку хлорофилл *a* составляет большую часть в общем пигментном фонде, значительное снижение его содержания в лишайниках (т. 2) свидетельствует о глубоких структурных изменениях фотосинтетического аппарата фотобионта вследствие техногенной нагрузки. Заметных различий в содержании хлорофилла у лишайников, произрастающих в т. 1, 3 и 4, не выявлено, что доказывает его стабильность в светособирающих комплексах фотосистем.

Установлено, что в лишайниках, отобранных в т. 1 и 2, содержание желтых пигментов и низкомолекулярных фенолов выше, чем для других образцов лишайников. Увеличение кариогенеза и синтеза фенолов в этих точках связано с техногенной нагрузкой.

Таблица 1

Зольность и элементный состав талломов лишайников

Точка отбора	Наименование образца	Элементный состав, %			Зольность, %
		C	N	S	
т. 1	<i>C. sylvatica</i>	40,5	0,91	0,09	2,77 ± 0,18
	<i>C. rangiferina</i>	40,8	1,22	0,11	1,90 ± 0,16
т. 2	<i>C. sylvatica</i>	40,7	1,63	0,07	3,29 ± 0,22
	<i>C. rangiferina</i>	41,8	1,81	0,08	2,41 ± 0,16
т. 3	<i>C. sylvatica</i>	42,6	0,67	0,04	1,47 ± 0,17
	<i>C. rangiferina</i>	42,8	1,35	0,04	1,11 ± 0,15
т. 4	<i>C. sylvatica</i>	42,0	1,92	0,06	0,64 ± 0,07
	<i>C. rangiferina</i>	41,9	1,99	0,05	0,31 ± 0,10

Таблица 2

Содержание пигментов и фенолов в талломах лишайников

Точка отбора	Наименование образца	Содержание, мкг/г			
		Хлорофилл <i>a</i>	Хлорофилл <i>b</i>	Каротиноиды	Фенолы
т. 1	<i>C. sylvatica</i>	181,9 ± 11,7	83,6 ± 8,2	79,1 ± 12,0	5,16 ± 0,11
	<i>C. rangiferina</i>	178,0 ± 8,5	84,6 ± 12,2	100,3 ± 12,8	6,11 ± 0,38
т. 2	<i>C. sylvatica</i>	87,5 ± 6,5	39,5 ± 9,1	68,5 ± 12,6	6,80 ± 0,47
	<i>C. rangiferina</i>	67,3 ± 10,6	28,5 ± 8,7	52,9 ± 13,1	6,40 ± 0,55
т. 3	<i>C. sylvatica</i>	91,3 ± 11,3	41,2 ± 8,8	41,5 ± 13,5	4,42 ± 0,44
	<i>C. rangiferina</i>	143,1 ± 10,8	66,8 ± 10,4	62,9 ± 15,1	4,89 ± 0,65
т. 4	<i>C. sylvatica</i>	208,8 ± 12,0	87,6 ± 11,1	41,8 ± 14,9	4,32 ± 0,61
	<i>C. rangiferina</i>	250,6 ± 9,4	100,0 ± 8,5	31,5 ± 14,0	5,48 ± 0,69

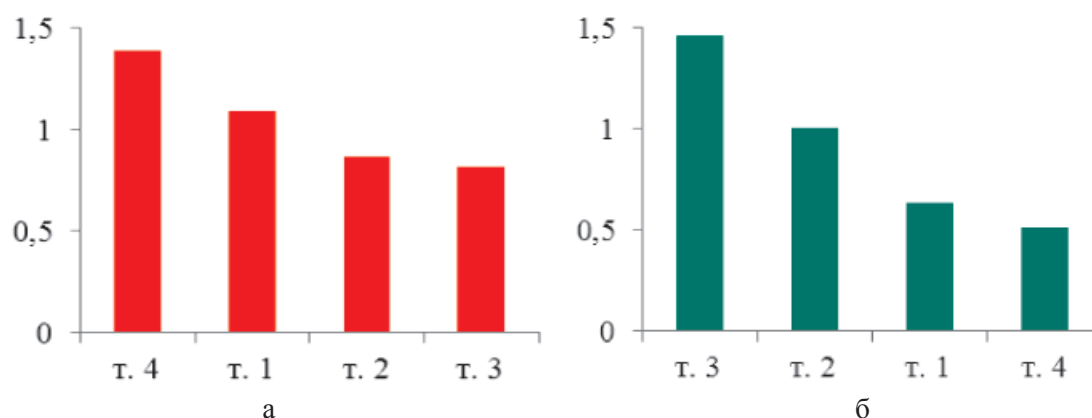


Рис. 2. Содержание лишайниковых веществ (в масс. %): а – усниновой кислоты в *C. sylvatica*; б – атранорина в *C. rangiferina*

Согласно литературным данным, влажность и освещенность оказывают значительное воздействие на биосинтез лишайниковых веществ. Известно, что лишайник *C. sylvatica* (светолюбивый вид) является продуцентом усниновой кислоты, а *C. rangiferina* (тенелюбивый вид) – атранорина [6]. По степени освещенности и влажности, определяющихся сомкнутостью древостоя, точки отбора лишайников можно расположить в следующие ряды: т. 4 > т. 1 > т. 3 > т. 2 и т. 2 > т. 3 > т. 1 > т. 4 соответственно. Выявлено наибольшее содержание усниновой кислоты в лишайнике *C. sylvatica* в т. 4 и атранорина в лишайнике *C. rangiferina* в т. 2 (рис. 2).

Под влиянием загрязнения атмосферы в лишайниках трансформируется не только органическая часть, но и минеральная. Это касается в первую очередь загрязнения тяжелыми металлами, часть которых – неотъемлемые компоненты выбросов от автотранспорта и различных предприятий.

Показано, что ряд накопления металлов для лишайников изменяется в зависимости

от условий местообитания и уровня техногенной нагрузки. Нами отмечено, что наблюдается уменьшение содержания железа (в масс. %) у лишайника *C. sylvatica* в ряду т. 2 (0,484) > т. 1 (0,318) > т. 3 (0,169) > т. 4 (0,085), как и у лишайника *C. rangiferina* в ряду т. 1 (1,42) > т. 2 (1,00) > т. 3 (0,106) > т. 4 (0,102). Такой же ряд сохраняется для Al, Mg, Ca, Cr, Si, V, Mn, Co, Ni и др. элементов.

Высокое содержание данных элементов в лишайниках связано с тем, что они являются основными компонентами трансграничных выбросов металлургических и горно-обогатительных предприятий, расположенных в Республике Карелия и Мурманской области, или обусловлено естественным региональным фоном.

Заключение

В результате анализа химического состава лишайников рода *Cladonia*, произрастающих в Евроарктическом регионе России, выявлены различия в содержании основных компонентов, связанные с влиянием эколого-климатических условий их произрастания:

а) установлено, что для лишайника *C. sylvatica*, произрастающего на хорошо освещенных участках (т. 1 и 4), характерно высокое содержание усниновой кислоты, а для лишайника *C. rangiferina*, произрастающего на затемненных участках (т. 2 и 3), – высокое содержание атранорина;

б) высокое содержание фенольных соединений и каротиноидов в лишайниках (т. 1 и 2) можно рассматривать как адаптивную реакцию на техногенное и антропогенное загрязнение. Фенолы и каротиноиды способны служить акцепторами свободных радикалов, снижая их токсичность;

в) показано, что для лишайников, произрастающих в т. 3 и 4, характерно высокое значение содержания хлорофиллов вследствие благоприятных природных условий их местообитания;

г) высокие зольность и содержание химических элементов в лишайниках (т. 1 и 2) обусловлены аэротехногенным переносом веществ в составе пылевых частиц выбросов автомобилей и малых котельных, присутствующих в поселках на исследуемой территории.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФАНО России в рамках научного проекта комплексной программы Уральского отделения РАН № 0410-2015-0021 «Новые подходы к комплексной оценке со-

стояния и эволюции лесных и болотных экосистем западного сегмента Арктики» в ЦКП НО «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

Список литературы

1. Галанин А.А., Глушкова О.Ю. Лихенометрия // Вестник РФФИ. – 2003. – № 3. – С. 3–38.
2. ГОСТ 24027.2-80. Сырье лекарственное растительное. Методы определения влажности, содержания золы, экстрактивных и дубильных веществ, эфирного масла. – М.: Изд-во стандартов. 1999. – 10 с.
3. Губайдуллин М.Г. Геоэкологические условия освоения минерально-сырьевых ресурсов Европейского Севера России. – Архангельск: Изд-во Поморского государственного университета, 2002. – 310 с.
4. Инсаров Г.Э., Инсарова И.Д. Оценка чувствительности лишайников к изменению климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2000. – Т. 17. – С. 106–121.
5. Инсарова И.Д. Влияние тяжелых металлов на лишайники // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 1983. – Т. 6. – С. 101–113.
6. Определитель лишайников СССР. Вып. 5. Кладониевые – Акароспоровые. – Л.: Наука, 1978. – 305 с.
7. Feige G.B., Lumbsch H.T., Huneck S., Elix J.A., Identification of Lichen substances by a standardized high-performance liquid chromatographic method // Journal of Chromatography. – 1993. – Vol. 646. – Issue 2, 3. – P. 417–427.
8. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.L. Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents // Biochem. Soc. Trans. – 1983. – Vol. 11. – P. 591–592.
9. Swain J., Hillis W.E. The phenolic constituents of *Prunus domestica*. I. The quantitative analysis of phenolic constituents // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 1959. – Vol. 10. – № 1. – P. 63–68.