

## ИЗУЧЕНИЕ ТРАНСПЛАНТИРОВАННЫХ ЛИШАЙНИКОВ ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НА ПРИМЕРЕ *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr.

© 2017 г. С.Е. Журавлёва, Ле Тхи Бич Нгуэт, П.В. Бондаренко, Э.М. Трухан

Московский физико-технический институт (государственный университет),  
141700, Долгопрудный Московской области, Институтский пер., 9

E-mail: solozhur@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.03.16 г.

После доработки 19.10.16 г.

Методами электронного парамагнитного резонанса и оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой изучены трансплантированные образцы эпифитного лишайника *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. в фоновой и урбанизированной зонах Московской области. Объединение физических методов и лишеноиндикации позволило установить периоды и степени изменения биофизических характеристик трансплантированных лишайников в различных условиях окружающей среды. ЭПР-спектроскопия показала, что количество парамагнитных центров в трансплантированных лишайниках было стабильно в течение четырех недель в фоновой зоне и составляло  $(2,6 \pm 0,4) \cdot 10^{17}$  спин/мг. Количество парамагнитных центров трансплантированных лишайников в урбанизированной зоне к концу третьей недели эксперимента увеличилось на  $1,1 \cdot 10^{17}$  спин/мг по сравнению с начальным значением  $(2,6 \pm 0,4) \cdot 10^{17}$  спин/мг. Методом оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой было определено содержание железа, марганца, меди, магния и цинка. Установлено изменение концентрации данных элементов в тех же образцах трансплантированных лишайников на протяжении четырех недель. К примеру, содержание меди в образцах лишайников в урбанизированной зоне увеличилось с  $7,5 \pm 2,7$  до  $56,4 \pm 8,6$  мкг/г к концу третьей недели эксперимента.

*Ключевые слова:* ЭПР, ИСП-ОЭС, лишеноиндикация, трансплантированные лишайники, парамагнитные центры, металлы.

Объединение физико-химических и биологических методов позволяет повысить эффективность мониторинга окружающей среды, в том числе давать более точный результат оценки качества атмосферного воздуха в урбанизированных зонах. Лишайники являются признанными индикаторами качества окружающей среды, поскольку они проявляют высокую чувствительность к действию биотических и абиотических факторов окружающей среды [1–28]. Ухудшение качества окружающей среды в урбанизированных зонах вызывает изменение внутриклеточных процессов жизнедеятельности лишайников, что отражается на снижении содержания хлорофилла в фотобионте, деструкции липидных мембран клеток, нарушении работы электронного транспорта в окислитель-

но-восстановительной системе органелл клеток лишайников. Эти изменения в лишайниках приводят к их гибели и образованию «лишайниковых пустыней» в урбанизированных зонах [1,29]. Поэтому мониторинг качества окружающей среды в урбанизированных зонах эффективен при совокупном использовании лишеноиндикационного и физических методов [7,30–32].

Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР-спектроскопия) является одним из перспективных физических методов, которые позволяют фиксировать изменение физиологического состояния лишайников в зависимости от качества окружающей среды [3,4,8–18,20–26,28,33]. В исследовании лишайников (более 800 образцов) на юго-западе Польши была установлена корреляция между среднегодовым содержанием диоксида серы в атмосфере и концентрацией парамагнитных центров (ПМЦ) в эпифитном лишайнике *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. Авторами было установлено,

Сокращения: ЭПР – электронный парамагнитный резонанс, ИСП-ОЭС – оптико-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой, ПМЦ – парамагнитные центры.

что увеличение количества ПМЦ в лишайнике связано с деструкцией лишайниковых кислот [3]. В России, на территории Московской области, были проведены исследования эпифитных лишайников методом ЭПР. По результатам данных исследований также было установлено, что изменение качества окружающей среды исследуемых территорий вызывает увеличение количества ПМЦ эпифитных лишайников разных видов [11,13,15,18,20–26,28].

Одним из признанных физических методов, позволяющих определять содержание химических элементов в образцах, является метод оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-ОЭС). Он также применяется для анализа химического состава лишайников на территориях крупных промышленных центров [17,18,23,27,34–36]. Исследователи из Турции определили методом ИСП-ОЭС содержание 35 элементов в 234 образцах лишайника *X. parietina* в Эгейском регионе. Они установили возможность использования полученных данных по содержанию металлов в лишайнике для мониторинга качества окружающей среды исследуемых территорий [36].

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования являлся эпифитный лишайник Ксантория настенная (*Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr.). Образцы лишайника были собраны 08.07.2014 г. со стволов форофитов вяза шершавого (*Ulmus glabra* Huds.) на западном склоне широколиственного лесного массива вдоль канала р. Москва г. Долгопрудный Московской области (55°56'32,71" с.ш., 37°28'53,49" в.д.). Сбор образцов лишайника проводили по общепринятым методам [37,38]. При сборе лишайника отбирали образцы диаметром не менее 4 см с характерными морфологическими признаками: со скученными апотециями в центральной части таллома и по его периферии [6].

Образцы лишайника на коре субстрата были закреплены на двух пластиковых стендах: четыре образца лишайника на первом стенде и 12 образцов – на втором. Первый стенд был помещен на двухметровой высоте от поверхности земли в фоновой зоне (55°59'3,33" с.ш., 37°30'41,16" в.д.), второй стенд – в урбанизированной зоне (55°55'22,57" с.ш., 37°31'44,15" в.д.). Ежедневно проводили сбор образцов урбанизированной зоны в течение месяца для того, чтобы установить изменения биофизических характеристик и химического состава трансплантированного лишайника, связанные с изменением качества окружающей среды. В качестве контроля использовали трансплантированный

лишайник фоновой зоны, сбор образцов проводили раз в две недели, что связано со стабильностью их физиологических параметров в данной зоне за двухнедельный период времени [39,40].

Биофизические характеристики образцов трансплантированного лишайника измеряли на ЭПР-спектрометре «СПЕКТР-001» (Россия). Приборная подготовка ЭПР-спектрометра выполнялась согласно регламенту по эксплуатации установки. Прибор работал на длине волны 3 см, с цилиндрическим резонатором типа Н<sub>011</sub>. В качестве калибровочного образца использовали рубин, закрепленный в резонаторе прибора и ориентированный так, чтобы его спектр не накладывался на спектр исследуемых образцов. Напряженность постоянного магнитного поля ( $H$ ) определяли непосредственно измерителем магнитной индукции, входящим в состав ЭПР-спектрометра. ЭПР-спектры регистрировали при следующих условиях: амплитуда модуляции магнитного поля была не более 0,2 мТл, скорость развертки магнитного поля – не более 0,1 мТл/с, постоянная времени – не более 2 с, ширина развертки поля составляла 51,2 и 3,2 мТл, уровень СВЧ-мощности – не более 12 мВт [25].

Подготовку образцов трансплантированного лишайника к измерению в ЭПР-спектрометре проводили согласно методике, описанной в патенте РФ № 2549471 [25]. Сигналы от образцов трансплантированного лишайника (50 мг) измеряли в пятикратной повторности. Количество ПМЦ в образце лишайника определяли путем сравнения ЭПР-спектра исследуемого образца и эталона по следующей формуле [25,41]:

$$N_x = N_{\text{эт}} \frac{(J_0 \Delta H_{\text{max}}^2)_x}{(J_0 \Delta H_{\text{max}}^2)_{\text{эт}}},$$

где  $N_x$  и  $N_{\text{эт}}$  – количество ПМЦ в образце лишайника и эталоне;  $J_0$  – амплитуда сигнала ЭПР-спектра;  $\Delta H_{\text{max}}$  – ширина сигнала ЭПР-спектра на уровне максимальной кривизны линии поглощения.

Определение химического состава в тех же самых образцах трансплантированного лишайника проводили на ИСП-ОЭС-спектрометре ICP 720-ES (Varian, США). Подготовку проб образцов лишайника к измерению проводили согласно методике, предложенной в кандидатской диссертации П.В. Бондаренко [40]. По данной методике образцы лишайника (50 мг) пересыпали в промаркированные стеклянные колбы и сжигали в муфельной печи при температуре 450°C в течение 4 ч. Затем колбы с

**Таблица 1.** Количество ПМЦ широкого и узкого пика ЭПР-спектра в образцах трансплантированного лишайника *X. parietina*

	Зона	0-я неделя	1-я неделя	2-я неделя	3-я неделя	4-я неделя
Количество ПМЦ широкого пика ( $\times 10^{17}$ спин/мг)	урбанизированная	$2,6 \pm 0,4$	$3,1 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,3$	$3,7 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,1$
	фоновая	$2,6 \pm 0,4$		$2,6 \pm 0,2$		$2,6 \pm 0,7$
Количество ПМЦ узкого пика ( $\times 10^{12}$ спин/мг)	урбанизированная	$2,7 \pm 0,5$	$9,1 \pm 0,4$	$2,2 \pm 0,2$	$8,8 \pm 0,3$	$2,1 \pm 0,5$
	фоновая	$2,7 \pm 0,5$		$6,7 \pm 0,6$		$2,7 \pm 0,5$

образцами лишайника в течение суток охлаждали до комнатной температуры. В каждую стеклянную колбу добавляли 10 мл раствора 1%-й азотной кислоты и перемешивали вращательными движениями. Данные пробы образцов лишайника помещали в ИСП-спектрометр и регистрировали интенсивность излучения на характерных длинах волн для железа, меди, марганца, магния, цинка (259,9, 324,7, 257,6, 280,2, 206,2 нм соответственно). Содержание исследуемых химических элементов определяли по градуировочной функции, построенной на основе спектров стандартных растворов в 1%-й азотной кислоте, содержащих все определяемые элементы в необходимой массовой концентрации, и холостой пробы (1%-й раствор азотной кислоты) [40].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

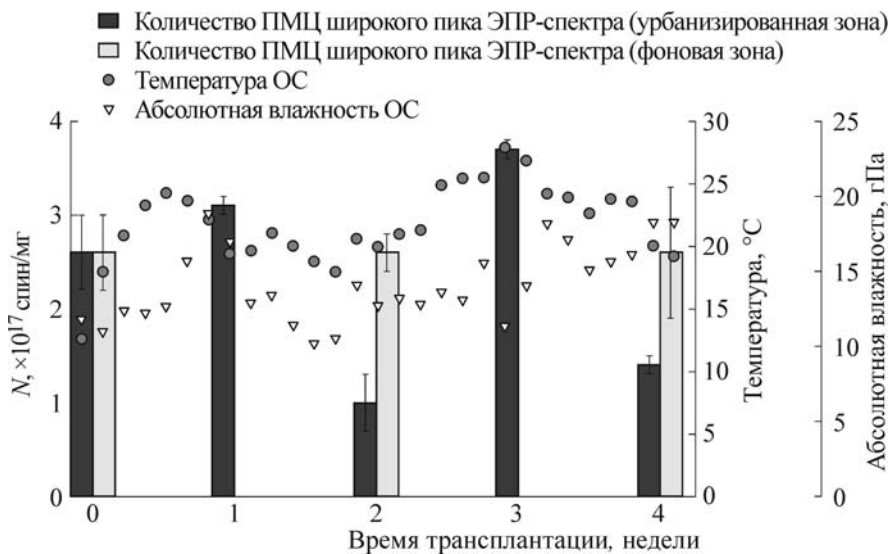
Методом ЭПР зарегистрированы характерные ЭПР-спектры с двумя пиками во всех образцах трансплантированного лишайника: узкий пик с шириной  $\Delta H_1 = 6,3 \pm 0,4$  Гс и значением  $g_1$ -фактора в диапазоне от 2,0032 до 2,0039 и широкий пик с шириной  $\Delta H_2 = 573 \pm 63$  Гс и значением  $g_2$ -фактора от 2,1056 до 2,1340.

Для фоновой зоны было показано, что количество ПМЦ широкого пика ЭПР-спектра в образцах трансплантированного лишайника стабильно в течение всего периода эксперимента (четыре недели) и его среднее значение составляло  $(2,6 \pm 0,4) \cdot 10^{17}$  спин/мг. Количество ПМЦ узкого пика ЭПР-спектра в этих образцах увеличивалось к концу второй недели и уменьшалось к концу четвертой недели эксперимента (табл. 1).

В урбанизированной зоне количество ПМЦ обоих пиков ЭПР-спектра изменялось сходным образом, причем изменение носило волнообразный характер. Количество ПМЦ широкого пика увеличивалось в 1,2 раза к концу первой недели, в 1,4 раза к концу третьей недели эксперимента и уменьшалось в 2,6 раза и в 1,9 раза

к концу второй и четвертой недели по сравнению с начальным значением (табл. 1). Количество ПМЦ узкого пика возрастало в 3,4 раза к концу первой недели и в 3,3 раза к концу третьей недели; уменьшалось в 1,2 раза к концу второй недели и в 1,3 раза к концу четвертой недели эксперимента относительно начального значения (табл. 1).

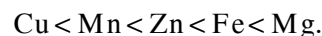
Лишайники принадлежат к организмам, у которых водный режим зависит от влажности окружающей среды, поэтому нами проанализировано влияние абиотических факторов (влажность и температура) окружающей среды данных зон на количество ПМЦ в образцах трансплантированного лишайника за весь период эксперимента [42]. Установлено, что к концу второй недели наблюдалось повышение температуры окружающей среды на  $7^\circ\text{C}$  (при начальной температуре  $13^\circ\text{C}$ ) и абсолютной влажности – на 0,9 гПа по сравнению с их значениями в начале эксперимента. К концу четвертой недели увеличение температуры окружающей среды составило  $+6^\circ\text{C}$  и абсолютной влажности – 6,5 гПа. При таких изменениях абиотических факторов окружающей среды количество ПМЦ широкого пика ЭПР-спектра в образцах лишайника фоновой зоны оставалось стабильным  $((2,6 \pm 0,4) \cdot 10^{17}$  спин/мг), а в образцах лишайника урбанизированной зоны происходило снижение количества ПМЦ. Самая низкая температура окружающей среды ( $13^\circ\text{C}$ ) была зафиксирована в начале эксперимента, самая высокая температура ( $28^\circ\text{C}$ ) – к концу третьей недели. Значение абсолютной влажности окружающей среды (11,4 гПа) к концу третьей недели было на 1,2 гПа больше по сравнению с ее наименьшим значением (10,2 гПа). Данные изменения абиотических факторов окружающей среды привели к росту количества ПМЦ широкого пика ЭПР-спектра до наивысшего значения  $((3,7 \pm 0,1) \cdot 10^{17}$  спин/мг) в образцах лишайника урбанизированной зоны к концу третьей недели. К концу четвертой недели при уменьшении температуры окружающей среды на  $9^\circ\text{C}$  и увеличении абсолютной влажности



**Рис. 1.** Влияние абиотических факторов (температура, абсолютная влажность) окружающей среды на количество ПМЦ широкого пика ЭПР-спектра трансплантированного лишайника *X. parietina* (абсолютная влажность выражена через парциальное давление водяных паров, гПа).

на 6,9 гПа количество ПМЦ широкого пика ЭПР-спектра в образцах лишайника снижалось на  $(2,3 \pm 0,2) \cdot 10^{17}$  спин/мг относительно предыдущей недели (рис. 1, табл. 1). Результаты исследования показали корреляцию между количеством ПМЦ в образцах лишайника и абиотическими факторами окружающей среды: максимальным значениям абсолютной влажности соответствовали минимальные значения количества ПМЦ в образцах лишайника, и наоборот. Предыдущими экспериментами по исследованию реакции лишайника на изменение качества окружающей среды методом ЭПР-спектроскопии нами было установлено, что при повышенной влажности воздуха уменьшается негативное воздействие окружающей среды на лишайник [39,40].

В урбанизированной зоне на образцы трансплантированного лишайника оказывали влияние не только абиотические факторы, на них воздействовали также и биотические (антропогенные) факторы, которые обусловлены разными видами загрязнений окружающей среды, содержащих органические и неорганические соединения. Это подтверждают данные по накоплению металлов в образцах трансплантированного лишайника, полученные методом ИСП-ОЭС (табл. 2). Установлено, что накопление металлов в образцах лишайника через две недели эксперимента в урбанизированной зоне и в образцах лишайника в фоновой зоне подчинялось следующей закономерности (табл. 2):



**Таблица 2.** Содержание металлов в образцах трансплантированного лишайника *X. parietina*

Время трансплантации, недели	Содержание металлов, мкг/г				
	Fe	Mn	Cu	Mg	Zn
Урбанизированная зона					
0	706,5 ± 35,3	25,4 ± 8,6	7,5 ± 2,7	1605,9 ± 26,0	47,9 ± 19,5
1	910,8 ± 81,0	25,8 ± 2,0	8,0 ± 1,4	1586,8 ± 35,7	46,1 ± 11,8
2	791,2 ± 152,0	26,2 ± 4,0	5,5 ± 1,0	1502,7 ± 14,5	36,9 ± 13,5
3	954,4 ± 12,8	30,8 ± 4,0	56,4 ± 8,6	992,8 ± 10,4	32,2 ± 1,6
4	799,0 ± 58,9	24,5 ± 0,6	47,9 ± 7,5	1458,2 ± 10,4	35,6 ± 3,7
Фоновая зона					
0	706,5 ± 35,3	25,4 ± 8,6	7,5 ± 2,7	1605,9 ± 26,0	47,9 ± 19,5
4	684,7 ± 40,5	18,0 ± 0,4	6,5 ± 2,9	1584,6 ± 1,6	31,3 ± 5,0

Аналогичная закономерность в накоплении металлов была показана ранее для лишайников в фоновой зоне [40].

Медь, способная к образованию оксалатов и комплексов с лишайниковыми кислотами, накапливается в клетках фотобионта лишайника, в избыточных концентрациях она токсична для клеток лишайника [43–46]. Поэтому рост содержания меди в образцах лишайника, экспонированных в урбанизированной зоне, свидетельствует об изменении качества окружающей среды. В урбанизированной зоне к концу третьей недели в образцах лишайника содержание меди увеличилось в восемь раз (от  $7,5 \pm 2,7$  до  $56,4 \pm 8,6$  мкг/г), в результате этого медь переместилась на две позиции в закономерности, и ряд содержания металлов приобрел новый вид (табл. 2):



По порядку содержания парамагнитных металлов (Fe, Mn, Cu) наибольший вклад принадлежал железу, которое в основном является естественным компонентом цепей переноса электронов в клеточном метаболизме лишайника. Так, установлено, что на первой неделе в образцах лишайника урбанизированной зоны его содержание в 35 раз превосходило содержание марганца и в 114 раз – содержание меди (табл. 2).

Количество непарамагнитных металлов (магний и цинк) в образцах лишайника в урбанизированной зоне имело свои особенности. Так, у всех образцов лишайника доминирующим непарамагнитным металлом был магний, содержание которого колебалось от  $992,8 \pm 10,4$  мкг/г до  $1605,9 \pm 26,0$  мкг/г. Доминирование магния в образцах лишайника довольно естественно, так как он входит в состав пигмента хлорофилла. Содержание цинка было значительно ниже – от  $32,2 \pm 1,6$  мкг/г до  $47,9 \pm 19,5$  мкг/г (табл. 2). Самое низкое содержание обоих металлов было отмечено к концу третьей недели эксперимента (рис. 2, табл. 2).

С помощью корреляционного анализа была обнаружена прямая зависимость содержания железа и меди, коэффициент корреляции составлял 0,78. Магний имел отрицательные коэффициенты с железом и медью, составившие  $-0,80$  и  $-0,82$  соответственно. Установлено, что количество ПМЦ широкого пика ЭПР-спектра в образцах трансплантированного лишайника положительно коррелировало с содержанием железа, коэффициент корреляции составил 0,64 (табл. 3).

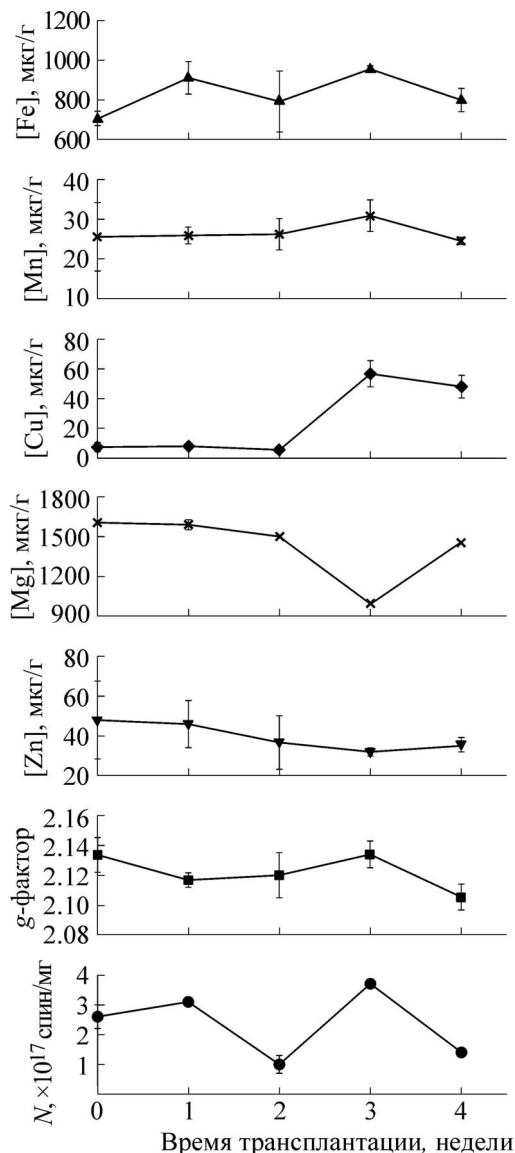


Рис. 2. Динамика изменения количества ПМЦ, g-фактора широкого пика ЭПР-спектра и содержания металлов в образцах трансплантированного лишайника *X. parietina* в урбанизированной зоне.

Изменение физиологических процессов в образцах трансплантированного лишайника приводит к изменению в них количества ПМЦ, которое можно связать с многовекторными процессами, такими как распад парамагнитных комплексов металлов, изменение окружения парамагнитных ионов, переход ионов металлов в другие комплексы [41,47].

По литературным данным природа узкого пика ЭПР-спектра определяется семихинонными свободными радикалами [3,4]. Природа широкого пика ЭПР-спектра определяется ионами парамагнитных металлов железа, марганца, меди и их комплексами [3,4,48–50]. Биологическая

**Таблица 3.** Коэффициенты корреляции содержания металлов между собой и количеством ПМЦ широкого пика ЭПР-спектра в образцах трансплантированного лишайника *X. parietina* урбанизированной зоны

	Cu	Mn	Mg	Zn	ПМЦ
Fe	<b>0,78</b>	0,47	<b>-0,80</b>	-0,07	<b>0,64</b>
Cu		0,47	<b>-0,82</b>	-0,24	0,33
Mn			-0,40	0,46	0,42
Mg				0,47	-0,50
Zn					0,23

функция железа основана на обратимой окислительно-восстановительной реакции ионов двухвалентного и трехвалентного железа и их способности образовывать октаэдрические комплексы, менять окислительно-восстановительный потенциал в зависимости от природы лигандов [51].

Мы предполагаем, что увеличение количества ПМЦ широкого пика ЭПР-спектра трансплантированного лишайника урбанизированной зоны к концу третьей недели эксперимента связано с влиянием меди на процессы метаболизма в образцах лишайника. Так, окислительно-восстановительные циклы между ионами одновалентной и двухвалентной меди могут катализировать образование высокотоксичных гидроксильных радикалов, вызывающих повреждение липидов, нуклеиновых кислот, белков и клеточных мембран фотобионтов и микобионтов лишайников [52,53]. Избыточное содержание меди в образцах вызывает снижение темпов роста, снижение концентрации хлорофилла *a* и магния, уменьшение активности фотосинтетической системы фотобионтов лишайников [54,55].

## ВЫВОДЫ

Получены новые экспериментальные данные по изучению биофизических механизмов реакции лишайников на примере *X. parietina* лихенологическим (трансплантация лишайников) и физическими (ЭПР-спектроскопия, ИСП-ОЭС-спектрометрия) методами. Установлено, что изменение внутриклеточных процессов жизнедеятельности лишайников в урбанизированной зоне связано с изменением концентрации парамагнитных металлов, в первую очередь железа и меди. Определяющим фактором в этом процессе является циклическое изменение ПМЦ, которое связано как с биотическими (антропогенными), так и с абиотическими факторами окружающей среды. В фоновой зоне количество ПМЦ широкого пика ЭПР-спектра исследуемых лишайников остается стабильным

за весь период эксперимента. Биофизические механизмы процессов жизнедеятельности лишайников изучены недостаточно, но полученные результаты исследования методами ЭПР-спектроскопии и ИСП-ОЭС-спектрометрия могут быть использованы как оптимальный инструмент мониторинга качества окружающей среды.

Авторы выражают благодарность к.т.н., доценту А.С. Лескову и к.б.н Д.В. Беляеву за усовершенствование радиоспектрометра «СПЕКТР-001» и ИСП-ОЭС-спектрометра ICP 720-ES.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. Nylander, *Collection in floram Karelicam* (Helsingfors, 1851).
2. M. R. D. Seaward, *Environ. Rev.* **1** (2), 73 (1993).
3. A. Jezierski, E. Bylinska, and M. R. D. Seaward, *Atmos. Environ.* **33** (28), 4629 (1999).
4. A. Jezierski, F. Czechowski, M. Jerzykiewicz, et al., *Spectrochim. Acta, Part A* **58** (6), 1293 (2002).
5. P. L. Nimis, G. Lazzarin, A. Lazzarin, et al., *Science of the Total Environment* **255** (1), 97 (2000).
6. Ю. Г. Суетина, Автореф. дис. ... канд. биол. наук (Марийс. гос. ун-т, Йошкар-Ола, 1999).
7. Л. Г. Бязров, *Лишайники в экологическом мониторинге* (Научный мир, М., 2002).
8. П. В. Бондаренко, в сб. *Труды 53-й науч. конф. МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»* (МФТИ, М., 2010), сс. 4–6.
9. С. Е. Журавлёва и П. В. Бондаренко, *Экологич. вестн.* **3** (17), 100 (2011).
10. С. Е. Журавлёва и А. А. Федоренко, *Экологич. вестн.* **4** (18), 114 (2011).
11. П. В. Бондаренко и С. Е. Журавлёва, в сб. *Труды всерос. молодежной конф. «Перспективы развития фундаментальных наук»* (МФТИ, М., 2011), сс. 95–96.
12. П. В. Бондаренко и С. Е. Журавлёва, в сб. *Материалы 11-й междунар. научн. конф. «Сахаровские чтения 2011 года: экологические проблемы XXI века»* (МГЭУ им. А.Д. Сахарова, Минск, 2011), с. 227.
13. П. В. Бондаренко и С. Е. Журавлёва, в сб. *Материалы всерос. конф. с междунар. участием «Спектроскопия и томография электронного парамагнитного резонанса в химии и биологии»* (М., 2011), с. 68.

14. Н. Н. Красногорская, С. Е. Журавлёва и П. В. Бондаренко, в сб. *Материалы всерос. науч.-практ. конф. «Техносферная безопасность, надёжность, качество, ресурсосбережение»* (РГСУ, Ростов-на-Дону, 2011), сс. 68–71.
15. П. В. Бондаренко и С. Е. Журавлёва, в сб. *Труды 55-й научн. конф. МФТИ «Молекулярная и биологическая физика»* (МФТИ, М., 2012), с. 33.
16. П. В. Бондаренко и С. Е. Журавлёва, в сб. *Научные статьи IX-й междунар. науч.-техн. конф. «Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2012)»* (УГАТУ, Уфа, 2012), сс. 124–129.
17. П. В. Бондаренко и С. Е. Журавлёва, в сб. *Труды 55-й научн. конф. МФТИ «Молекулярная и биологическая физика»* (МФТИ, М., 2012), сс. 189–190.
18. П. В. Бондаренко, С. Е. Журавлёва и Д. В. Беляев, в сб. *Труды всерос. молодежной науч. школы «Прикладные математика и физика: от фундаментальных исследований к инновациям»* (МФТИ, М., 2012), сс. 119–120.
19. А. А. Федоренко и С. Е. Журавлёва, в сб. *Труды 55-й научн. конф. МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе»* (МФТИ, М., 2012), сс. 190–191.
20. П. В. Бондаренко и С. Е. Журавлёва, в сб. *Труды междунар. науч.-метод. конф. «Современные проблемы биофизики сложных систем. Информационно-образовательные процессы»* (ВГУ, Воронеж, 2013), сс. 106–108.
21. П. В. Бондаренко и С. Е. Журавлёва, в сб. *Тезисы докладов междунар. конф. «Биодиагностика в экологической оценке почв и сопредельных сред»* (М., 2013), с. 26.
22. С. Е. Журавлёва, П. В. Бондаренко и Э. М. Трухан, *Биофизика* **58** (2), 329 (2013).
23. С. Е. Журавлева, П. В. Бондаренко и Ле Тхи Бич Нгуен, *Международный научный институт «Education»* **5** (3), 61 (2014).
24. П. В. Бондаренко и С. Е. Журавлёва, в сб. *Труды 3-й междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых «Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование»* (МППУ, М., 2014), сс. 87–90.
25. С. Е. Журавлёва и П. В. Бондаренко, Патент РФ № 2549471 (2015).
26. С. Е. Zhuravleva and P. V. Bondarenko, in *Conf. Abstr. Book «BIT's 4<sup>th</sup> annual conference and EXPO of analytiX – 2015»* (Nanjing, 2015), p. 247.
27. А. Ф. Мейсунова и А. А. Нотов, *Журн. прикл. спектроскопии* **82** (6), 928 (2015).
28. Т. Б. Н. Ле, П. В. Бондаренко и С. Е. Журавлева, в сб. *Материалы XI междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные вопросы биологической физики и химии БФФХ-2016»* (Севастополь, 2016), сс. 32–34.
29. W. Nylander, *Flora*, **8** (1875).
30. V. Palomäki, S. Tynnyrinen, and T. Holopainen, *Annales Botanici Fennici* **29** (1), 25 (1992).
31. L. C. Pearson, in *Lichens as bioindicators of air quality* (Fort Collins, 1993), pp. 89–95.
32. L. Lucadamo, A. Corapi, S. Loppi, et al., *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* **70** (3), 506 (2016).
33. J. Lisowski, A. Jezierski, and E. Bylicska, *Appl. Magn. Res.* **5** (1), 15 (1993).
34. М. Томпсон и Д. Н. Уолш, *Руководство по спектральному анализу с индуктивной плазмой* (Недра, М., 1988).
35. A. Demirbas, *Energy Sources* **26** (5), 499 (2004).
36. S. Yenisoy-Karakaş and S. G. Tuncel, *Sci. Total Environ.* **329** (1), 43 (2004).
37. *Методы лишеноиндикации загрязнений окружающей среды. Методическое пособие* (М., 1997).
38. Н. Н. Красногорская, Н. Ю. Цвиленева, Г. Р. Минуллина и др., Патент РФ № 2260934 С1 (2004).
39. Отчет НИР (промежуточный, этап № 2) по программе ФЦП (№ ГР 01201261133); рук. С. Е. Журавлева; исполн.: П. В. Бондаренко и др. (МФТИ, М., 2013).
40. П. В. Бондаренко, Дис. ... канд. биол. наук (Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т), Долгопрудный, 2013).
41. Л. А. Блюменфельд, В. В. Воеводский и А. Г. Семенов, *Применение электронного парамагнитного резонанса в химии* (Новосибирск, 1962).
42. <http://pogodaiklimat.ru/weather.php?id=27501&bday=11&fday=31&amonth=7&ayear=2014>
43. O. W. Purvis, *The Lichenologist* **16** (2), 197 (1984).
44. O. W. Purvis, J. A. Elix, J. A. Broomheadj, et al., *The Lichenologist* **19** (2), 193 (1987).
45. O. W. Purvis, J. A. Elix, and K. L. Gaul, *The Lichenologist* **22** (3), 345 (1990).
46. M. K. Chettri, T. Sawidis, G. A. Zachariadis, et al., *Environ. Exp. Bot.* **37** (1), 39 (1997).
47. А. Н. Тихонов, *Сорос. образоват. журн.* **11**, 8 (1997).
48. S. C. Saab and L. Martin-Neto, *J. Braz. Chem. Soc.* **19** (3), 413 (2008).
49. A. Jezierski, J. Drozd, M. Jerzykiewicz, et al., *Appl. Magn. Reson.* **14** (2–3), 275 (1998).
50. M. Jerzykiewicz, J. Drozd, and A. Jezierski, *Chemosphere* **39** (2), 253 (1999).
51. R. Hell and U. W. Stephan, *Planta* **216** (4), 541 (2003).
52. G. Sandmann and P. Boger, *Plant Physiol.* **66** (5), 797 (1980).
53. B. Halliwell and J. M. Gutteridge, *Biochem. J.* **219** (1), 1 (1984).
54. M. K. Chettri, C. M. Cook, E. Vardaka, et al., *Environ. Exp. Bot.* **39** (1), 1 (1998).
55. M. Backor, D. Fahselt, R. D. Davidson, et al., *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* **45** (2), 159 (2003).

## Study of Transplanted Lichens with the Use of Physical Methods: the Case of *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr.

S.E. Zhuravleva, Le Thi Bich Nguyet, P.V. Bondarenko, and E.M. Trukhan

*Moscow Institute of Physics and Technology (State University),  
Institutskij per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, 141700 Russia*

Electron paramagnetic resonance spectroscopy and inductively coupled plasma optical emission spectrometry were used to study the epiphytic lichen *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. transplanted to natural and urbanized zones in the Moscow region. The combination of physical and lichen-indication methods allowed us to determine periods as well as the magnitude of changes in the biophysical characteristics of the transplanted lichen in different environmental conditions. The electron paramagnetic resonance spectroscopy results showed that the number of paramagnetic centers in lichens transplanted to the natural zone was stable after four weeks ( $(2,6 \pm 0,4) \cdot 10^{17}$  spin/mg). The number of paramagnetic centers in lichens transplanted to the urbanized zone increased by  $1,1 \cdot 10^{17}$  spin/mg by the end of the third week as compared with the control value ( $(2,6 \pm 0,4) \cdot 10^{17}$  spin/mg). Inductively coupled plasma optical emission spectrometry was used to estimate the iron, copper, manganese, magnesium, and zinc content. Changes in concentration of these elements in the same samples of transplanted lichen were found after four weeks. For instance, the copper content in lichens transplanted to the urbanized zone increased from  $7,5 \pm 2,7$   $\mu\text{g/g}$  to  $56,4 \pm 8,6$   $\mu\text{g/g}$  by the end of the third week of the experiment.

*Keywords: EPR, ICP-OES, lichen-indication, transplanted lichen, paramagnetic centers, metals*