

Исследования
антропогенно-измененных
экосистем и урбоэкология

DOI: 10.31862/2500-2963-2018-2-34-51

А.П. Зарубина, Т.Ю. Толпышева, Е.В. Сорокина

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, г. Москва, Российская Федерация

Экотоксикологическая оценка состояния городской среды на примере мегаполиса Москвы

С использованием двух тест-систем, индикации на основе характеристик видового состава лишайников и биотестирования на основе бактериальной люминесценции проведена оценка экологического состояния воздушной среды и почв 14 улиц восьми административных округов города Москвы. Большинство из 28 видов выделенных лишайников по устойчивости к загрязнению воздушной среды отнесены к I и II классам токсикофобности. Приведены данные изменения морфологии их талломов. Обсуждено влияние специфичности химического загрязнения поллютантами воздушной среды на рост определенных видов лишайников. Большое число выявленных нитрофильных видов лишайников свидетельствует о специфике экологии городской среды. Экспресс-методом (30 мин) биотестирования на основе бактериальной люминесценции определены индексы токсичности почвенных образцов из мест сбора лишайников. Многие почвенные образцы были токсичны или очень токсичны. В некоторых почвенных образцах выявлена мозаичность грунта почвы: пробы одного образца почвы имели разные индексы токсичности.

Совместное использование лишеноиндикации и биотестирования на основе бактериальной люминесценции расширяет возможности мониторинга объектов окружающей среды, позволяя оценить действие как долговременно накапливающихся загрязняющих факторов воздушной среды, так и наличие возможных загрязнителей определенной химической природы почв городских территорий. Использование этих двух тест-систем может быть полезно для устранения локальных загрязнителей и существенным звеном в благоустройстве мест обитания.

Ключевые слова: лихиноиндикация, бактериальная люминесценция, лишайники, воздушная среда, почва.

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Зарубина А.П., Толпышева Т.Ю., Сорокина Е.В. Экотоксикологическая оценка состояния городской среды на примере мегаполиса Москвы // Социально-экологические технологии. 2018. № 2. С. 34–51.

DOI: 10.31862/2500-2963-2018-2-34-51

A.P. Zarubina, T.Yu. Tolpysheva, E.V. Sorokina

Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119991, Russian Federation

Ecotoxicological assessment of the urban environment on the example of Moscow

Using lichinoindication and biotesting on the basis of bacterial luminescence the ecological state of the air environment and soils of 14 streets 8 of the administrative districts of the city of Moscow was assessed. Lichens of 28 species are distinguished, mainly in relation to air pollution of the I and II classes of toxicophobia. The influence of specificity of chemical contamination by pollutants of the air environment on the growth of certain lichen species is discussed. A large number of identified nitrophilous lichen species indicates a specific ecology of the urban environment. Express method (30 min) of biotesting on the basis of bacterial luminescence identified the toxicity index of soil samples from the lichen collection sites. Many soil samples were toxic or very toxic. In some soil samples soil mosaic was revealed, in which samples of one soil sample had different toxicity indices. The joint use of lichinoindication and biotesting on the basis of bacterial luminescence can be useful for eliminating local pollutants and an essential link in the improvement of habitats. This indicates the expediency of practical use of these biomonitoring methods.

Key words: lichinoindication, bacterial luminescence, lichens, air environment, soil.

CITATION: Zarubina A.P., Tolpysheva T.Yu., Sorokina E.V. Ecotoxicological assessment of the urban environment the example of Moscow. *Socialno-ecologicheskije tehnologii*. 2018. № 2. Pp. 34–51.

Введение

Начиная с 1990-х гг. экологическая ситуация в г. Москве, крупнейшем мегаполисе, значительно изменилась под влиянием антропогенной деятельности. Закрытие многих промышленных предприятий способствовало улучшению чистоты воздуха, однако резко возросло число автотранспорта, что негативно сказалось на количестве загрязнителей окружающей среды, поступающих в атмосферу и почву. Мониторинг состояния окружающей среды химическими методами анализа важен, но узнать, насколько изменения неблагоприятны для обитания живых организмов, можно только с помощью методов биомониторинга. Тест-организмы, обладая высокой чувствительностью, простотой и доступностью в использовании, позволяют обнаружить наиболее загрязненные местообитания.

Лихеноиндикация является одним из старейших методов экологического мониторинга многолетних антропогенных изменений компонентов воздушной среды, что позволяет использовать ее в качестве удобных визуальных биоиндикаторов [Бязров, 2002]. Лишайники имеют низкую скорость обмена веществ, являясь пойкилогидридными организмами, способны быстро впитывать и накапливать в большом количестве в своем талломе токсикутанты, содержащиеся в осадках. Морфологические и физиологические особенности таллома связаны с местами обитания и зависимостью обилия определенных видов лишайников с чувствительностью к поллютантам. Практическое использование лихеноиндикации, методически простое и достаточно быстрое, дополняет наши знания антропогенного влияния на экологическое состояние окружающей среды с учетом специфической чувствительности к загрязнению.

Перспективным дополнением к лихеноиндикации состояния воздушной среды служит широко известный экспрессный (5–30 мин) метод биотестирования на основе бактериальной люминесценции. Этот метод используют для первичной количественной и качественной оценки интегральной токсичности как объектов окружающей среды (почвенной, водной и воздушной), так и различных химических веществ, их смесей и эффектов действия физических факторов [Zarubina, Gapochka, Novoselova, Gapochka, 2013; Зарубина, Сорокина, 2015]. При этом метод позволяет выявить не только долговременное загрязнение объектов окружающей среды, но и в режиме онлайн токсичность всех анализируемых образцов.

Ранее с использованием «батарей» этих двух тест-систем – лихеноиндикации и биотестирования на основе бактериальной люминесценции –

мы оценивали загрязнения воздушной среды некоторых мест Щелковского района Московской области [Зарубина, Толпышева, Плеханов, 2016].

В данной работе с использованием двух тест-систем (лихеноиндикации и биотестирования на основе бактериальной люминесценции) оценивали состояние как воздушной, так и почвенной среды на 14 улицах восьми административных округов г. Москвы. Выявлены наиболее загрязненные участки и показана перспективность экспресс-биомониторинга окружающей среды мегаполиса. В комплексе с инструментальными методами такие экспрессные исследования могут быть существенным звеном в системе устранения загрязнителей среды и благоустройства мест обитания.

Материалы и методы

Лишайники собирали на высоте 1,5–1,7 м со всех древесных пород, на которых они росли, и в одном пункте – с бетона. Всего обследовано 14 пунктов (п.) восьми административных округов г. Москвы (табл. 1). Исследовали видовой состав лишайников, их специфичность токсикофобности, а также токсичность почв в каждом пункте, где собирали лишайники. Видовой состав лишайников определяли классическими методами. Для оценки степени устойчивости лишайников к загрязнению использовали шкалу классов токсикофобности Л.Г. Бязрова с небольшим дополнением [Бязров, 2009]:

I класс – лишайники, толерантные к очень высокому уровню загрязнения;

II класс – лишайники, выдерживающие высокий уровень загрязнения;

III класс – лишайники, выдерживающие средний уровень загрязнения;

IV класс – лишайники, выдерживающие умеренное загрязнение;

V класс – лишайники, чувствительные к загрязнению.

Почвенные образцы собирали в пунктах сбора лишайников из верхнего, гумусового горизонта по методу «конверта» (при его сторонах ≈ 1 –2 м). Из одного почвенного образца каждого пункта выбирали произвольно не менее 4–5 проб. Почву освобождали от камней и корней растений и тщательно растирали. Измельченные образцы почвы заливали стерильной дистиллированной водой в соотношении 1 : 5, тщательно встряхивали. Водную экстракцию почвенных проб осуществляли при комнатной температуре (≈ 20 –22 °С) в течение 24 ч в стеклянных, плотно закрытых бюксах. Мутные водные экстракты почв фильтровали через бумажные широкопористые мягкие фильтры. В анализах определения индексов токсичности почвенных образцов использовали верхний отстоявшийся водный слой экстракта почвы.

Определение индекса токсичности (T) почвенных образцов осуществляли с использованием в качестве биотеста (биосенсора) генно-инженерный штамм *Escherichia coli* K12 TGI с созданным светящимся фенотипом, полученным при клонировании lux-оперона из природных почвенных бактерий *Photobacterium luminescens* ZMI – симбионта нематод, паразита насекомых. Штамм получен и хранится на кафедре микробиологии биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, известен как биосенсор тест-системы «Эколюм-08» [Danilov, Zarubina, Eroshnicov et al., 2002]. В эксперименте лиофильновысушенные клетки биосенсора регидратировали холодной дистиллированной водой в течение 30 мин, используя бактериальные суспензии в разведении. Плотность суспензий бактерий определяли нефелометрически ($\lambda = 670$ нм) и выражали числом клеток в 1 мл по калибровочной кривой. Определение pH водных образцов осуществляли потенциометрически и с помощью иономера «ЭВ-74». Для стандартизации значений pH в процедуре биотестирования до соответствующих значений pH контрольного образца уравнивали с pH опытных образцов 2NNaOH.

При биотестировании водных почвенных экстрактов в каждую контрольную и опытную кюветы объемом 1,5 мл наливали 0,1 мл водной суспензии биосенсора. В контрольную кювету добавляли 0,9 мл дистиллированной воды, в опытную кювету – 0,9 мл водного экстракта почвы, используя в пробе биосенсор $7,6 \text{ м} \cdot 10^7$ клеток на 1 мл. Интенсивность свечения (имп./с) биотеста контрольного и опытного образцов регистрировали одновременно через 5, 15 и 30 мин. с помощью люминометра «Биотокс 6МС» (Россия) при температуре 20 °С. Индекс токсичности (T) образцов определялся автоматически по программе люминометра по формуле:

$$T = \frac{100(I_k - I)}{I_k},$$

где I_k – интенсивность свечения контроля; I – интенсивность свечения опыта.

Оценку токсичности исследуемых образцов почвы классифицировали по трем группам значений индекса токсичности: $T < 20$ – образец нетоксичен; $T > 20$, но < 50 – образец токсичен; $T > 50$ – образец очень токсичен [Там же]. Иногда наблюдали стимуляцию свечения тест-организма, т.е. значение T с отрицательным знаком. Анализировали не менее 4–5 проб одного образца почвы, рассчитывая их индекс токсичности. Полученные данные обрабатывали статистически в программе MS Excel.

Результаты и их обсуждение

Всего выявлено 28 видов лишайников (табл. 1), что составляет примерно пятую часть всех видов лишайников, зарегистрированных в Москве в 1990-е гг. [Бязров, 2009]. Из 28 выявленных видов лишайников 25 видов росли на древесных породах, 4 вида – на бетоне, вид *Candelariella aurella* – на бетоне и деревьях. Состояние окружающей среды оказывает влияние на физиологию, анатомическое и морфологическое строение лишайников. Среди выявленных 28 видов лишайников из всех пунктов их сбора 16 видов имели накипный, 12 листоватый талломы (рис. 1).

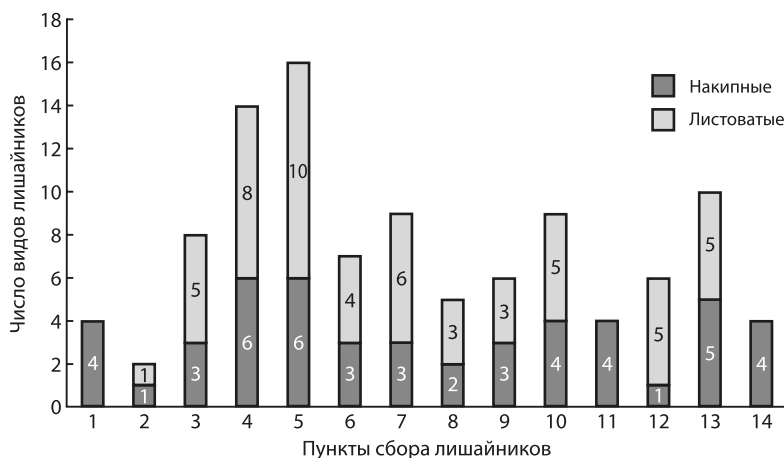


Рис. 1. Распределение видов лишайников (из 28 найденных видов), имеющих накипную и листоватую форму таллома, по пунктам их сбора

Fig. 1. Distribution of lichen species (out of the 28 found species), which have a scaling and foliage form of the thallus, according to the points of their collection

Лишайники, имеющие накипный таллом, как правило, более устойчивы к загрязнению, чем лишайники с листоватым талломом. Отсутствовали виды лишайников с кустистым талломом, которые считают наиболее чувствительными к загрязнению воздуха. Из 28 найденных видов лишайников 15 эпифитных видов относят к I и II классам токсикофобности, что может являться показателем экологического неблагополучия в местах их произрастания (табл. 2, 3). На бетоне найдены лишайники только III класса токсикофобности, выдерживающие средний уровень загрязнения.

Таблица 1

Адреса пунктов сбора и классы токсикофобности выделенных видов лишайников

Пункты [Collection points for lichens]	Адреса сбора лишайников [Lichen Collection Addresses]	Число видов лишайников [Number of lichen species]	Классы токсикофобности [Classes of toxiphobia]
1	ЦАО, Средний Овчинниковский пер., д. 1	4	I; II
2	ЦАО, Сухаревская пл., д. 10/31	2	I
3	САО, Бутырская ул., д. 89	8	I; II; III; IV
4	САО, Долгопрудная ул., д. 13	14	I; II; III
5	СВАО, ВДНХ (у павильона «Космос»)	16	I; II; III; IV
6	СВАО, Полярная ул., д. 10	7	I; II; III
7	СЗАО, ул. Народного Ополчения, д. 19	9	I; II; III
8	СЗАО, Туристская ул., д. 15	5	I; II
9	ЮАО, Варшавское шоссе, д. 32	6	I; II; III
10	ЮАО, Чергановская ул., д. 21	9	I; II; III; IV
11	ЮАО, Братевская ул., д. 27	4	III
12	ЮВАО, Шоссейная ул., д. 29	6	I; II
13	ВАО, Ивanteeвская ул., д. 4/1	10	I; II; III
14	ЗАО, Можайское шоссе, д. 20	4	I; II

С о к р а щ е н и я: ВАО – Восточный административный округ, ЗАО – Западный административный округ, САО – Северный административный округ, СВАО – Северо-Восточный административный округ, СЗАО – Северо-Западный административный округ, ЦАО – Центральный административный округ, ЮАО – Южный административный округ, ЮВАО – Юго-Восточный административный округ.

Таблица 2

Выявленные виды лишайников, пункты их сбора и классы токсикофобности
[Types of lichens, collection points and classes of toxicophobia for lichens]

Виды лишайников [Types of lichens]	Классы токсикофобности [Classes of toxicophobia]	Пункты сбора [Collection points for lichens]
<i>Caloplaca serina</i> (Ehrh. ex Hedw.) Th. Fr.	II	4; 8; 9; 10; 13
<i>C. flavovirescens</i> (Wulfen) Dalla Torre et Sarnth.	III	11
<i>C. holocarpa</i> (Hoffm. ex Ach.) M. Wade	III	4; 5; 6; 9; 10; 13
<i>C. saxicola</i> (Hoffm.) Nordin	III	11
<i>Candelariella sp.</i>	–	7
<i>C. aurella</i> (Hoffm.) Zahlbr.	III	3; 11
<i>C. xanthostigma</i> (Ach.) Lettau	III	5; 10; 13
<i>C. vitellina</i> (Hoffm.) Müll. Arg.	II	4; 5;
<i>Lecania dubitans</i> (Nyl.) A. L. Sm.	III	7
<i>Lecanora sp.</i>	–	4
<i>L. crenulatissima</i> Mereschk.	III	11
<i>L. hagenii</i> (Ach.) Ach.	I	3; 6; 9
<i>L. sambuci</i> (Pers) Nyl.	II	12
<i>Mycobilimbia tetramera</i> (De Not.) W. Brunnbauer	–	5; 13

Окончание табл. 2

Виды лишайников [Types of lichens]	Классы токсикофобности [Classes of toxicophobia]	Пункты сбора [Collection points for lichens]
<i>Parmelia sulcata</i> Taylor	II	4; 5
<i>Phaeophyscia nigricans</i> (Flörke) Moberg	II	1; 3–10; 12–14
<i>P. orbicularis</i> (Neck.) Moberg	I	1–10; 12–14
<i>Physcia adscendens</i> (Fr.) H. Olivier	II	3; 4; 5; 7; 12–14
<i>P. aipolia</i> (Ehrh. ex Humb.) Führ.	IV	3; 5; 10
<i>P. dubia</i> (Hoffm.) Lettau	II	4
<i>P. stellaris</i> (L.) Nyl.	I	5; 7; 10; 12
<i>P. tenella</i> (Scop.) DC.	II	1; 4; 5; 6
<i>Physconia distorta</i> (With.) J.R. Laundon	III	5
<i>P. grisea</i> (Lam.) Poelt	II	7
<i>Rinodina archaea</i> (Ach.) Arnold	III	4; 5
<i>Scoliotosporum chlorococcum</i> (Graewe ex Stenrh.) Vězda	I	2–8; 10; 13
<i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th. Fr.	I	1; 3–10; 12–14
<i>X. polycarpa</i> (Hoffm.) Th. Fr. ex Rieber	II	4; 5; 13

Таблица 3

**Патоморфологические изменения талломов некоторых растущих видов лишайников
[Pathomorphological changes in the thalli of lichen species]**

Пункты сбора [Collection points for lichens]	Субстрат роста лишайников [Substrate of lichen growth]	Виды лишайников [Types of lichens]	Повреждение таллома [Damage to the thallus]
1	Тополь бальзамический (<i>Populus balsamifera</i> L.),	<i>Phaeorhyscia orbicularis</i>	Один из талломов – изменен цвет
7	Тополь бальзамический <i>Populus balsamifera</i> L.),	<i>P. orbicularis</i>	Изменен цвет
		<i>P. nigricans</i>	Изменен цвет
		<i>P. orbicularis</i>	50% – изменен цвет
10	Вяз гладкий (<i>Ulmus laevis</i> PALL.)	<i>P. nigricans</i>	Очень угнетен, изменен цвет
		<i>Physconia grisea</i>	Мелкие размеры, изменен цвет
13	Клен остролиственный (<i>Acer platanoides</i> L.)	<i>Phaeorhyscia nigricans</i>	Частично разрушен
	Клен ясенелистный (<i>Acer negundo</i> L.)	<i>P. orbicularis</i>	Разрушен верхний корковый слой

Мы не выделили ни одного вида V класса лишайников, наиболее чувствительных к загрязнению (табл. 2). При этом размеры некоторых лишайников были небольшими, плохо развиты и у них отсутствовали плодовые тела.

Анализ числа видов и токсифобности лишайников, морфологии форм таллома и показателей роста показали, что наиболее неблагоприятная ситуация в п. 2. Здесь найдено всего 2 вида лишайников: *Scoliciosporum chlorococcum* и *Phaeophyscia orbicularis*, наиболее устойчивых к загрязнению (I класса токсикофобности).

При этом ацидофильные лишайники вида *Scoliciosporum chlorococcum* относят к наиболее устойчивым к содержанию в атмосфере SO_2 . Эти лишайники, наряду с лишайниками вида *Lecanora conizaeoides*, растут в зонах, где другие виды лишайников отсутствуют [Batič, 2002]. Неблагополучная ситуация воздушной среды отмечена, в основном, в п. 1, 2, 8 и 14. Там обнаружены виды лишайников I и II классов токсикофобности (см. табл. 1, 2). Здесь выделено малое число видов лишайников: по 4 вида в п. 1 и 14; 5 видов в п. 8. При этом в п. 1 у лишайников *Phaeophyscia orbicularis*, растущих на тополе, отмечено изменение цвета талломов, что является дополнительным показателем, что ситуация несколько хуже, чем в п. 8 и 14.

Следует отметить, что более благоприятная ситуация характерна для п. 3, 5 и 10. Здесь, наряду с видами лишайников, которые относят к I, II и III классам токсикофобности, присутствуют лишайники вида *Physcia aipolia* IV класса токсикофобности, т.е. предпочитающие для роста места с умеренным загрязнением. В п. 5, по сравнению со всеми другими исследованными пунктами, условия максимально благоприятны для роста лишайников; здесь зарегистрировано наибольшее число их видов – 16.

Патоморфологический анализ таллома лишайников (изменения окраски, размеров, и др.) так же, как их токсикофобность, отражают состояние окружающей среды. Площадь пораженных участков талломов лишайников зависит от расстояния до источника загрязнения и выражается прямой корреляционной зависимостью, однако связь с возрастом таллома слабо выражена [Бязров, 2002]. Талломы лишайников, обитающих в загрязненных районах, часто имеют меньшие размеры, цвет их изменен, органы размножения плохо развиты или отсутствуют [Малышева, 1995]. У большинства найденных видов лишайников, растущих на различных субстратах в разных пунктах, изменений в морфологии и анатомии талломов не отмечены. Наиболее заметные патоморфологические изменения таллома наблюдали у видов лишайников I и II классы токсикофобности из семейства *Physciaceae* (см. табл. 3).

В настоящее время в зависимости от преобладания особенностей химического загрязнения в воздушной среде специфичность роста определенных видов лишайников, включая нитрофильные виды, хорошо известна [Batić, 2002]. Большое число зарегистрированных нами в исследованных пунктах нитрофильных видов лишайников свидетельствует о специфике экологии городской среды. В числе выделенных нами лишайников преобладали нитрофильные виды семейств Physciaceae и Teloschistaceae. Одними из наиболее «азотолюбивых» являются лишайники вида *Phaeophyscia orbicularis*. Несколько меньше реагирует на высокое содержание азотистых соединений лишайники вида *Xanthoria parietina*. Вместе с нитрофильными видами отмечены в нескольких пунктах ацидофильные лишайники вида *Scoliciosporum chlorococcum*, выдерживающие высокие уровни SO_2 . Вероятно, экологическая амплитуда их шире, чем предполагали ранее. Увеличение обилия нитрофильных видов многие исследователи связывают с уменьшением выбросов в атмосферу SO_2 и увеличением содержания азотистых соединений [Van Herk, 2001; Nash, 2010]. Увеличение общего числа видов лишайников и обилия нитрофильных видов в Москве в 2006 г., по сравнению с началом 1990-х гг., отмечено ранее [Бязров, 2013], что также связывают с изменением общей экологической ситуации при снижении содержания в атмосфере SO_2 и увеличением в атмосферном воздухе азотистых соединений.

На территории мегаполиса Москвы представлены различные типы почв: урбаноземы, реплантоземы, «запечатанные» почвы и др. [Экологический атлас Москвы, 2000], которые отличаются по своим свойствам от почв неиндустриальных районов. Урбаноземы Москвы, по сравнению с подмосковными почвами, более щелочные [Добровольский, Строганова, 1996]. Большинство типов городских почв – урбаноземы – почвы искусственного происхождения, в которых антропогенное воздействие становится преобладающим над естественными факторами почвообразования, и часто характеризуются мозаичностью грунтов. Известно, что до 30–40% площадей вблизи застроенных жилых территорий занимают «запечатанные» почвы под асфальтом, дорожными покрытиями, непроницаемые для водного и воздушного обмена. «Запечатанные» почвы практически не участвуют ни в малом биогеохимическом, ни в большом (геологическом) круговороте веществ [Забелина, Злышко, 2015].

Данные оценки интегральной токсичности исследуемых нами почвенных образцов, взятые из разных пунктов сбора лишайников, представлены на рис. 2 и 3. Было установлено, что только в п. 7 была нетоксичная почва (рис. 3), где образцы почв собирали у деревьев зеленого сквера.

Используемый анализ почвенных образцов, взятых в п. 7, указывает на благоприятное, вероятно, недавнее окультуривание этого почвенного грунта. При том, что в п. 7 выявлена почти треть (9) видов лишайников I, II и III классов токсикофобности, а это свидетельствует о недостаточно благоприятном состоянии воздушной среды, связанным с загрязнением атмосферы в течение длительного времени (см. табл. 1, 2).

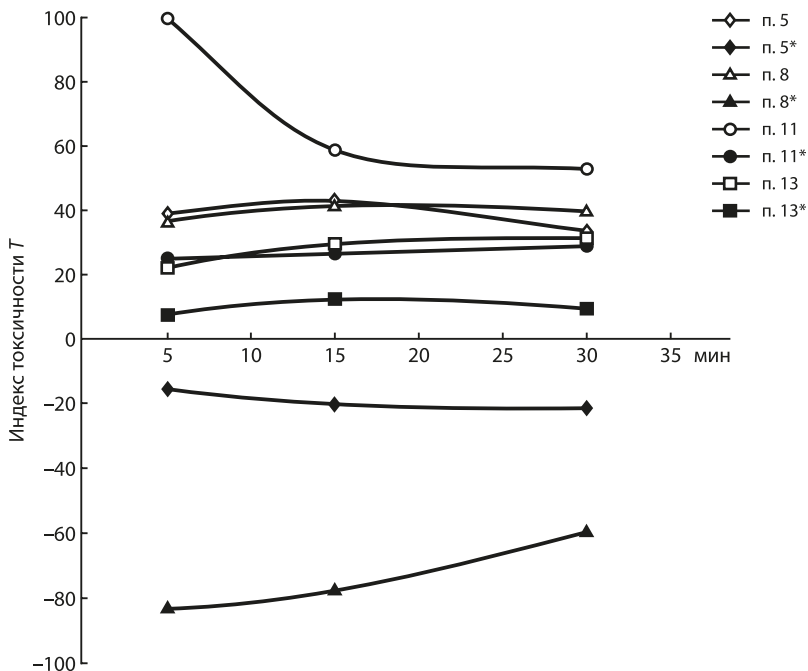


Рис. 2. Оценка индекса токсичности в течение 5, 15 и 30 мин мозаичного грунта образцов почвы, взятых из пунктов 5, 8, 11 и 13 сбора лишайников

Fig. 2. Assessment of the toxicity index for 5, 15 and 30 min of mosaic soil samples taken from the collection of lichens points 5, 8, 11 and 13

Исследуемые пробы образцов почвы в п. 3, 4, 9 и 13 были токсичны или очень токсичны (рис. 3). В некоторых пунктах (п. 5, 8, 11 и 13) выявлена мозаичность грунта почвы, в них пробы из одного образца почвы имели разные индексы токсичности.

Особое внимание обращают данные анализа биотестирования образца почвы, собранные в п. 11. Исследуемый образец имел мозаичный грунт, вероятно, представленный двумя типами почв:

- 1) реплантоземом, состоящим из маломощного гумусового слоя, слоя торфо-компостной смеси или слоя органико-минерального вещества;
- 2) «запечатанным» типом почвы.

Две пробы этого образца почвы были токсичны, индекс токсичности увеличивался незначительно во времени от 5 до 30 мин ($T \approx$ от 22 до 33). Три других пробы этого же образца почвы к 5 мин анализа были очень токсичны ($T \approx 100$), но с каждой минутой анализа их токсичность резко снижалась (T от 100 до ≈ 60). На основании того, что до анализа пробы почвы были герметично закрыты, их токсичность быстро снижалась в открытой пробе.

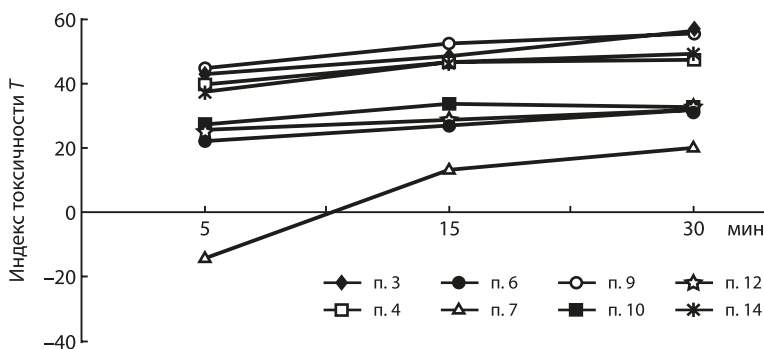


Рис. 3. Оценка индекса токсичности в течение 5, 15 и 30 мин образцов почвы, взятых из пунктов 3, 4, 6, 7, 9, 10, 12 и 14 сбора лишайников

Fig. 3. Assessment of toxicity index for 5, 15 and 30 min soil samples taken from the collection of lichens points 3, 4, 6, 7, 9, 10, 12 and 14

Причина этого эффекта, по нашему мнению, очевидна и указывает на наличие в этих пробах почвенного образца газовой фракции. Наличие в почве очень токсичного летучего вещества, вероятно, газа, может свидетельствовать то обстоятельство, что пробы почвы были взяты в п. 11, на Братеевской улице, где ранее была бывшая городская свалка. Вследствие этого часть исследуемого почвенного грунта образца п. 11 содержала токсичный газ, который мог быть образован в результате микробной деструкции, что широко известно для подобных свалок [Микробная деградация..., 2014]. Можно предполагать, что данная мозаичная почва была недостаточно окультуривана при последующих застройках.

Стимуляция интенсивности люминесценции у светящихся бактерий при действии многих веществ в низких концентрациях отмечена

ранее многими авторами, которые предлагают делать вывод об отсутствии токсичности исследуемых образцов [Danilov, Zarubina, Eroshnicov et al., 2002]. Однако механизм стимуляции интенсивности бактериальной люминесценции не ясен и затрудняет интерпретацию результатов. Возможно, что при действии ксенобиотиков стимуляция ими функционирования люминесцентной системы биотеста связана с конкуренцией этой системы с их дыхательной системой за восстановленный флавин. Вследствие этого происходит подавление транспорта электронов в дыхательной цепи, соответственно, поток электронов в этой цепи снижается, эквивалентно возрастая в цепи люминесцентной системы. В результате интенсивность биолюминесценции повышается, а регистрируемый в этот момент индекс токсичности приобретает отрицательное значение. Подобный феномен стимуляции многих биологических процессов, называемый гормезис, широко известен в токсикологии, его наблюдают при действии практически любых потенциально токсичных веществ в малой концентрации. Ксенобиотики в малых концентрациях, действуя на различные функции организмов, со временем не только полностью компенсируют первичные деструктивные изменения, но могут приводить их в состояние повышенной активности, т.е. стимулировать. Предполагают, что при определенных параметрах токсического воздействия фаза, на которой ответ превышает поражение, может продлиться до конца жизни объекта [Филенко, 2001]. Некоторые исследователи стимулирующее действие ксенобиотика как реакцию тест-объектов на воздействие токсикантов, противоположную угнетению до уровня 30%, по сравнению с контролем, считают нетоксическим действием [Влияние ряда токсикантов..., 2011].

Метод биотестирования на основе бактериальной люминесценции, наряду с количественной и качественной оценкой токсического действия ксенобиотиков, позволяет предполагать возможную химическую природу исследуемого образца при анализе изменения показателей токсического действия во времени [Zarubina, Perfiliev, Sorokina, Netrusov, 2016]. Так, резкое усиление токсичности во времени анализа (5, 15, 30 мин) предполагает наличие в исследуемых образцах тяжелых металлов, а изменение с последующей стабилизацией или с некоторым снижением токсичности предполагает наличие в исследуемом образце органического соединения. Возможность экспрессного анализа по выявлению химических особенностей почвы позволяет принять определенные меры для устранения тех или иных загрязнителей в случае их наличия. Примером тому могут быть и полученные нами данные биотестирования образца почвы на Братеевской улице (п. 11), как можно предполагать,

пробы его мозаичного грунта, вероятно, были представлены токсикантами органической природы, в том числе газа.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Выявлено недостаточно благоприятное экологическое состояние воздушной и почвенной сред мегаполиса Москвы, что, обусловлено нитрофикацией воздушной среды и недостаточно окультуренными участками почв. Это подтверждено наличием большого числа нитрофильных видов лишайников I и II классов токсикофобности, устойчивых к токсикантам, и наличием мест недостаточно окультуренной почвы.

2. Метод биотестирования токсичности почвенных участков за 30 мин анализа позволяет выявить места наибольшей токсичности почвы и возможную химическую природу загрязнителя, например, данные наличия токсичного летучего вещества, вероятно, газа, почвы бывшей свалки.

3. Совместное использование лишеноиндикации и биотестирования на основе бактериальной люминесценции расширяет возможности мониторинга объектов окружающей среды, позволяя оценить действие как долговременно накапливающих загрязняющих факторов воздушной среды, так и наличие загрязнителей почв городских территорий. Эти две тест-системы удобны, доступны, результативны, перспективны для широкого круга исследований, они могут быть полезны для устранения локальных загрязнителей, а также могут быть существенным звеном в экологическом благоустройстве.

Библиографический список / References

1. Бязров Л.Г. Динамика видового разнообразия эпифитных лишенизированных грибов Южного округа Москвы // Принципы экологии. 2013. № 1. С. 33–50. [Byazrov L.G. Dynamics of species diversity of epiphytic lichenized fungi in the Southern District of Moscow. *Principles of Ecology*. 2013. № 1. Pp. 33–50.]

2. Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. М., 2002. [Byazrov L.G. Lishainiki v ekologicheskom monitoringe [Lichens in ecological monitoring]. Moscow, 2002.]

3. Бязров Л.Г. Эпифитные лишайники г. Москвы: современная динамика видового разнообразия. М., 2009. [Byazrov L.G. Epifitnye lishainiki Moskvi: sovremennaya dinamika vidovogo raznoobraziya [Epiphytic lichens of Moscow: Modern dynamics of species diversity]. Moscow, 2009.]

4. Влияние ряда токсикантов на флуоресценцию хлорофилла клеток водорослей и возможность его ослабления гуматами / Саксонов М.Н., Балаян А.Э., Таран Д.О., Бархатова О.А. // Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге: Сб. ст. Ярославль, 2011. С. 207–209. [Saxonov M.N., Balayan A.E., Taran D.O., Barkhatova O.A. Influence of a number of toxicants on fluorescence of chlorophyll of algal cells and the possibility of its

weakening by humates. *Vodorosli: problemy taksonomii, ekologii i ispol'zovanie v monitoring*. Yaroslavl. 2011. Pp. 207–209.]

5. Добровольский Г.В., Строганова М.Н. Почвы Москвы // Наука в России. 1996. № 4. С. 69–72. [Dobrovolsky G.V., Stroganova M.N. Soil of Moscow. *Science in Russia*. 1996. No 4. Pp. 69–72.]

6. Забелина О.Н., Злышко А.С. Биологическая активность запечатанной почвы урбанизированных территорий // Успехи современного естествознания. 2015. № 5. С. 167–170. [Zabelina O.N., Zlyvko A.S. Biological activity of sealed soil in urbanized areas. *The successes of modern natural science*. 2015. No. 5. Pp. 167–170.]

7. Зарубина А.П., Сорокина Е.В. Первый среди равных. Один из самых экспрессных и доступных методов биотестирования – бактериально люминесцентный тест // Евразийский Союз ученых. Биологические науки. 2015. Т. 7. № 8. С. 161–163. [Zarubina A.P., Sorokina E.V. The first among equals. One of the most rapid and affordable methods for biotesting a bacterially luminescent test. *The Eurasian Union of Scientists. Biological Sciences*. 2015. Vol. 17. No 8. Pp. 161–163.]

8. Зарубина А.П., Толпышева Т.Ю., Плеханов С.Е. Оценка загрязнения воздушной среды методами биотестирования // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 8. С. 44–48. DOI: 10.18412/1816-0395-2016-8-44-48. [Zarubina A.P., Tolpyшева T.Yu., Plekhanov S.E. Evaluation of Air Pollution by Biological Testing Methods. *Ecology and Industry of Russia*. 2016. Vol. 20. № 8. Pp. 44–48. DOI: 10.18412/1816-0395-201684448.]

9. Мальшева Н.В. Об экологической патоморфологии лишайников в окрестностях Санкт-Петербурга // Новости систематики низших растений. 1995. Т. 30. С. 78–85. [Malisheva N.V. On the ecological pathomorphology of lichens in the vicinity of St. Petersburg. *Novosti sistematiki nizshih rastenii*. 1995. Vol. 30. Pp. 78–85.]

10. Микробная деградация промышленных отходов / Домрачева Л.И., Ашихмина Т.Я., Елькина Т.С., Гайфутдинова А.Р. // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 2. С. 6–16. [Domracheva L.I., Ashixmina T.Ya., El'kina T.S., Gayfutdinova A.R. Microbial degradation of industrial wastes. *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. № 2. Pp. 6–16.]

11. Филенко О.Ф. Динамика эффекта загрязняющих веществ в экотоксикологии // Токсикологический вестник. 2001. № 2. С. 2–6. [Filenko O.F. Dynamics of the effect of polluting in ecotoxicology. *Toxicological Herald*. 2001. № 2. Pp. 2–6.];

12. Экологический атлас Москвы / Рук. проекта И.Н. Ильина. М., 2000. [Ekologicheskii atlas Moskvu [Ecological atlas of Moscow]. I.N. Il'ina (ed.). Moscow, 2000.]

13. Batič F. Bioindication of sulphur dioxide pollution with lichens. *Protocols in Lichenology: culturing, biochemistry, ecophysiology and use in biomonitoring* Kranner I., Beckett R., Varma A. (eds.). Berlin, Heidelberg, New York, 2002. Pp. 483–506.

14. Danilov V.S., Zarubina A.P., Eroshnicov G.E., Solov'eva L.N., Kartashev F.V., Zavil'gelsky G.B. The bioluminescent sensor systems with lux-operons from various species of luminescent bacteria. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2002. № 3. Pp. 20–24.

15. Nash T.H. Nitrogen its metabolism and potential contribution to ecosystems. *Lichen Biology*. Nash T.H. (ed.). Cambridge, 2010. Pp. 218–237.

16. Zarubina A.P., Gapochka M.G., Novoselova L.A., Gapochka L.D. Effect of low intensity electromagnetic radiation on the toxicity of domestic wastewater tested with

the “Ecolum” test system. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2013. Vol. 68. № 1. Pp. 49–52. DOI: 10.3103/S0096392512030108.

17. Zarubina A.P., Perfiliev YuD., Sorokina E.V., Netrusov A.I. Evaluation of the properties of potassium ferrate used for water purification by luminescence bioassay. *Moscow University biological sciences bulletin*. 2016. Vol. 71. № 4. Pp. 226–230. DOI: 10.3103/S0096392516040131.

18. Van Herk C.M. Bark pH and susceptibility to toxic air pollutants as independent causes of changes in epiphytic lichen composition in space and time. *Lichenologist*. 2001. Vol. 33. No 5. Pp. 419–441.

Статья поступила в редакцию 11.03.2018

The article was received on 11.03.2018

Зарубина Алевтина Петровна – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник кафедры микробиологии биологического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Zarubina Alevtina P. – PhD in Biology; senior researcher at the Department of Microbiology of the Biological Faculty, Lomonosov Moscow State University

E-mail: al-zar1@yandex.ru

Толпышева Татьяна Юрьевна – доктор биологических наук; ведущий научный сотрудник кафедры микологии и альгологии биологического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Tolpysheva Tatiana Yu. – Dr. Biol. Hab.; leading researcher at the Mycology and Algology Department of the Biological Faculty, Lomonosov Moscow State University

E-mail: tolpyшева@mail.ru

Сорокина Елена Владимировна – кандидат биологических наук; научный сотрудник кафедры микробиологии биологического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Sorokina Elena V. – PhD in Biology; senior researcher at the Department of Microbiology of the Biological Faculty, Lomonosov Moscow State University

E-mail: sorokina_ev77@mail.ru