

УДК 582.29:543.42 (470.331)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КИСЛОТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ФУРЬЕ-ИК СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИНДИКАТОРНЫХ ЛИШАЙНИКОВ

Мейсурова А.Ф., Хижняк С.Д., Нотов А.А., Пахомов П.М.

ФГБОУ ВПО «Тверской государственной университет», Тверь, e-mail: alexandrauraz@mail.ru

С помощью метода Фурье-ИК спектроскопии выяснена специфика воздействия кислотных поллютантов на лишайники. Выяснено, что некоторые кислотные поллютанты (H_2SO_4 , HNO_3) поглощаются и взаимодействуют с химическими компонентами эпифитных лишайников. Под действием H_2SO_4 , HNO_3 совместно HNO_3 и H_2SO_4 в лишайниках могут образовываться алкилнитраты ($R-O-NO_2$), сульфоны ($R-SO_2R$), а также алкилнитраты и сульфоны одновременно. Соединения HCl , а также его сочетание с HNO_3 и H_2SO_4 оказываются высокотоксичными и не накапливаются лишайником. Наилучшими индикаторными свойствами обладают среднеустойчивые к атмосферному загрязнению виды *Hypogymnia physodes* и *Parmelia sulcata*. В спектрах этих лишайников обнаружены существенные изменения. Использование данных Фурье-ИК спектроскопии в мониторинге урболикенофлор позволили идентифицировать загрязнение воздуха серо- и азотсодержащими поллютантами в районе функционирования ТЭЦ (тепловых электростанций) и автомагистралей.

Ключевые слова: лишайники, *Hypogymnia physodes*, *Parmelia sulcata*, *Xanthotia parietina*, *Evernia mesomorpha*, Фурье-ИК спектроскопия, диоксиды азота и серы, поллютанты, сульфоны, алкилнитраты

IDENTIFICATION OF THE ACIDIC AIR POLLUTION BY IR SPECTROSCOPIC STUDY OF INDICATOR LICHENS

Meysurova A.F., Khizhnyak S.D., Notov A.A., Pakhomov P.M.

Tver State University, Tver, e-mail: alexandrauraz@mail.ru

Specifics of influence of acid pollutant on lichens is established by means of Fourier transform IR (FTIR) spectroscopy. It is found out that some acid pollutant (H_2SO_4 , HNO_3) are absorbed and interact with chemical components of epiphytic lichens. Both H_2SO_4 and a combination of HNO_3 and H_2SO_4 might stimulate the formation of either alkyl nitrates ($R-O-NO_2$) or sulphones ($R-SO_2R$), or else alkyl nitrates and sulphones all in one. The compound HCl and its combinations with HNO_3 and H_2SO_4 appear to be highly toxic, and lichen does not accumulate these ones. Mid-resistant species to atmospheric pollution *Hypogymnia physodes* and *Parmelia sulcata* exhibit the best indicative properties. Substantial changes were revealed in the infrared spectra of these lichens. The using of FTIR spectroscopy in the monitoring of urban lichen flora allowed us to identify the air pollution by sulphur- and nitrogen-containing pollutants in vicinity of active TPP (Thermal Power Plant) and motor-roads.

Keywords: lichen, *Hypogymnia physodes*, *Parmelia sulcata*, *Xanthotia parietina*, *Evernia mesomorpha*, FTIR spectroscopy, nitrogen and sulphur dioxides, pollutant, alkyl nitrates, sulphones

В настоящее время возрастает объем поллютантов, поступающих в атмосферу. Актуальна разработка подхода, позволяющего осуществлять эффективный мониторинг атмосферного загрязнения. В качестве индикаторных объектов особый интерес представляют эпифитные лишайники. В серии работ была показана целесообразность использования Фурье-ИК спектрального анализа [4, 5, 8]. Этот метод позволяет выявлять разные поллютанты, оценивать характер и уровень взаимодействия их с биологическими объектами. Для более широкого использования этого подхода в мониторинге экосистем необходимы специальные исследования. Они позволяют оценить индикаторную способность разных видов лишайников, выявить механизмы взаимодействия лишайников с разными поллютантами [12]. По результатам таких исследований можно подобрать наиболее чувствительные тест-объекты. Они будут использоваться в мониторинге с учетом специфики воздействия разных поллютантов. Все это позволит повысить эффективность мониторинга состояния атмосферы.

Для дальнейшей разработки мониторинга с использованием Фурье-ИК спектрального анализа лишайников необходимы модельные эксперименты и исследования на территории урбоэкосистем [3, 11]. В более ранних работах в качестве объекта использовали *Hypogymnia physodes*. В настоящее время хорошо изучено влияние серной и азотной кислот на *Hypogymnia physodes* [4, 5]. Актуальна оценка индикаторной способности других эпифитных лишайников. Необходимо изучение других кислотных экотоксикантов. Целесообразно выяснение механизмов воздействия при комплексном загрязнении несколькими поллютантами.

Цель исследования – разработка методики мониторинга с использованием Фурье-ИК спектрального анализа лишайников.

Задачи:

1) изучение характера воздействия разных кислотных поллютантов (серной, азотной и соляной кислот), включая варианты их комбинированного воздействия в лабораторных условиях;

2) оценка индикационной способности широко распространенных видов лишайников (*Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Parmelia sulcata* Tayl., *Evernia mesomorpha* (Flot.) Nyl., *Xanthoria parietina* (L.) Belt.);

3) выяснение возможностей метода на территории урбоэкосистем.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования выбрали 4 вида лишайников, которые встречаются повсеместно. Лишайники отличаются степенью чувствительности к действию загрязнителей. Среди них среднеустойчивые к загрязнению виды (*Hypogymnia physodes* и *Parmelia sulcata*), чувствительные (*Evernia mesomorpha*) и устойчивые (*Xanthoria parietina*) [7]. Материал собрали в фоновой зоне, которая располагается в 60 км от г. Твери (окрестности дер. Ферязкино Калининского р-на Тверской обл.).

В лабораторных условиях влажные образцы лишайников выдержали в аэрозолях HNO_3 , H_2SO_4 и HCl в течение 7 дней при температуре $22\text{--}24^\circ\text{C}$ (табл. 1).

Выбор загрязнителей обусловлен превращением диоксидов серы и азота (SO_2 и NO_2) во влажном воздухе в токсичные соединения – H_2SO_4 и HNO_3 [2]. К кислотным выбросам атмосферы относят хлороводород (HCl), имеющий локальный характер – при производстве эмалей, фарфора, при сжигании отходов. Влажные образцы 1–12 прикрепляли к внутренней поверхности крышки эксикаторов ($V = 1$ л) над 30 мл 0,5% кислотами (табл. 1). Аналогичным образом проводили комбинированное воздействие нескольких загрязнителей на лишайник (13–24), т.е. в аэрозоли HNO_3 и H_2SO_4 , HNO_3 и HCl , H_2SO_4 и HCl . Выбор концентраций кислот определен условиями модельного эксперимента – необходимостью получения быстрого эффекта от воздействия загрязнителя. В природных условиях концентрации загрязнителей в воздухе значительно ниже, и его действие на лишайник имеет накопительный характер. Спектры образцов *H. physodes* (1–24) регистрировали на Фурье-ИК спектрометре «Equinox 55» фирмы «Bruker» в диапазоне $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$, разрешение составляло 4 см^{-1} , количество сканов – 32.

Таблица 1

Схема проведения эксперимента

Вид	Тип воздействия					
	отдельное			комбинированное		
	HNO_3	H_2SO_4	HCl	$\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{HNO}_3 + \text{HCl}$	$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HCl}$
<i>Hypogymnia physodes</i>	1*	5	9	13	17	21
<i>Parmelia sulcata</i>	2	6	10	14	18	22
<i>Evernia mesomorpha</i>	3	7	11	15	19	23
<i>Xanthoria parietina</i>	4	8	12	16	20	24

Примечание. * – номер образца.

Для апробации результатов модельного эксперимента с помощью метода ИК-спектроскопии проанализировали образцы широко распространенного

лишайника *H. physodes*, собранных вблизи Тверских ТЭЦ (ТЭЦ-1, ТЭЦ-3 и ТЭЦ-4) и автомагистралей с интенсивным движением (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика местообитаний лишайников, собранных на территории г. Твери

Номер образца	Местообитание лишайников	Источник загрязнения ¹	Основные загрязнители ²
25	Центральный р-н: Тверской пр.	Автотранспорт с карбюраторными двигателями, изношенность основного автопарка, использование системы выхлопа ниже «Euro-2»	CO_x , NO_x , CH_4 , SO_2
26	Пролетарский р-н: пр. Калинина		
27	Московский р-н: пл. Гагарина		
28	Пролетарский р-н: возле ТЭЦ-1 В 200 м от ТЭЦ-1	Процессы сжигания топлива: мазут, газ,	SO_2 , NO_x , твердые частицы
29			
30	Заволжский р-н: возле ТЭЦ-3	Уголь, мазут, торф, газ	
31	Московский р-н: возле ТЭЦ-4	Мазут, торф, газ	

Примечание. ¹ – [11].

Результаты исследования и их обсуждение

Модельный эксперимент. Спектральный анализ лишайников, испытывавших отдельное и комбинированное воздействие загрязнителей, показал следующие резуль-

таты. ИК-спектры образцов 1–24 отличаются в зависимости от типа экотоксиканта и видовой специфичности. Исследования изменений в химическом составе лишайников на основе их ИК-спектров позволили условно выделить два основных варианта

воздействия поллютантов на лишайники. Первый связан с поглощением слоевищем поллютанта и, как следствие, с существенными изменениями в химическом составе лишайника; второй не связан с накоплением поллютанта, изменения в химическом составе лишайников отсутствуют или несущественны, отмечается быстрая деструкция слоевища. К первому варианту относится отдельное и комбинированное действие на лишайники HNO_3 и H_2SO_4 . Спектральный анализ этих образцов показал изменения в химическом составе, связанные с поглощением поллютанта слоевищами индикаторных видов.

Воздействие HNO_3 . В спектре образца *Hypogymnia physodes* (1) отмечены новые полосы при $1384 \nu_3(-\text{O}-\text{NO}_2)$, 875 и $779 \text{ см}^{-1} \delta(\text{O}-\text{N}-\text{O})$, указывающие на алкилнитраты ($\text{R}-\text{O}-\text{NO}_2$) (рис. 1, а) [5, 6, 10, 12]. Аналогичные изменения обнаружены в спектрах образцов (2–4) других индикаторных видов лишайников (рис. 1, b–d). Алкилнитраты в лишайниковом слоевище образуются путем взаимодействия HNO_3 со свободными гидроксильными группами лишайника (L_1), основного компонента клеточных стенок:



Образование алкилнитратов в лишайниках сопряжено с окислением свободных OH-групп лишайника до карбонильных ($> \text{C}=\text{O}$) и карбоксильных групп ($> \text{COOH}$) [1]. В этой связи в спектрах образцов некоторых индикаторных видов зарегистрировано увеличение интенсивностей полос, ответственных за колебания соответствующих групп, усиливающих деструкцию слоевища. Количественный анализ ИК-спектров образцов 1–4 показал, что среди индикаторных видов у *Evernia mesomorpha* отно-

сительное содержание алкилнитратов одно из высоких ($A_{1385}/A_{2925} = 4,0$). Меньше всего алкилнитратов обнаружено в образцах устойчивого к загрязнению вида *Xanthoria parietina* ($A_{1387}/A_{2925} = 2,13$ при данных условиях эксперимента).

Экспонирование лишайников в аэрозоле HNO_3 вызвало внешние изменения окраски и уплотнение корового слоя. Слоевища *Hypogymnia physodes*, *Parmelia sulcata* и *Evernia mesomorpha* местами приобрели желтовато-бежевый цвет. У *Parmelia sulcata* были обнаружены небольшие по площади некротические пятна. Изменения плотности корового слоя – вероятно, адаптивная реакция, которая уменьшает токсичность воздействия стрессора, снижает уровень поступления поллютанта. Для мониторинговых исследований загрязнения атмосферы аэрозолью HNO_3 подходят все изученные виды лишайников. Они активно накапливают поллютант. Однако, несмотря на высокую поглотительную способность *Evernia mesomorpha*, целесообразно применять виды *Parmelia sulcata* и *Hypogymnia physodes*. Деструкция слоевища, быстрый некроз делает эти виды хорошими индикаторами загрязнения воздуха HNO_3 .

Воздействие H_2SO_4 . В спектрах образцов среднеустойчивых к загрязнению видов (5–6), экспонированных в аэрозоле H_2SO_4 , обнаружены изменения, связанные с образованием в лишайниках сульфонов ($\text{R}-\text{SO}_2\text{R}$) (рис. 2). О присутствии в лишайниках (5–6) сульфонов свидетельствуют новые полосы при $1313 \nu_3(\text{SO}_2)$, 781 , 663 и $518 \text{ см}^{-1} \nu(\text{S}-\text{O}-\text{C})$ [4, 7]. Образование сульфонов в лишайниках сопровождается деструкцией слоевища, внешними изменениями. Их образование может происходить по реакции:



Среди индикаторных видов лишайников наиболее поврежденными оказались образцы *Parmelia sulcata* и *Hypogymnia physodes*. Скорость проявления внешних изменений позволяет предположить, что порог чувствительности к действию поллютанта у *Parmelia sulcata* выше, чем у *Hypogymnia physodes*. Изменения в спектрах образцов *Evernia mesomorpha* и *Xanthoria parietina* выражены в меньшей степени, чем у среднеустойчивых видов. В спектрах образцов *Evernia mesomorpha* (7) зарегистрировано слабое поглощение при $1356 \nu_3(\text{SO}_2)$. К действию H_2SO_4 *Xanthoria parietina* оказалась более устойчива. В ИК-спектре образца 8 не выявлено полос поглощения, связанных с поглощением поллютанта и образованием

сульфонов. Данные об изменениях в химическом составе, а также внешние проявления позволяют выстроить следующий ряд чувствительности лишайников по отношению к H_2SO_4 :

Parmelia sulcata – *Hypogymnia physodes* – *Evernia mesomorpha* – *Xanthoria parietina*.

В приведенном ряде устойчивость к действию данного поллютанта возрастает слева направо. Виды *Parmelia sulcata* и *Hypogymnia physodes* целесообразно использовать в практике мониторинговых исследований загрязнения атмосферы H_2SO_4 . Высокая толерантность к H_2SO_4 делает *Xanthoria parietina* непригодным объектом для оценки воздушного загрязнения этим поллютантом.

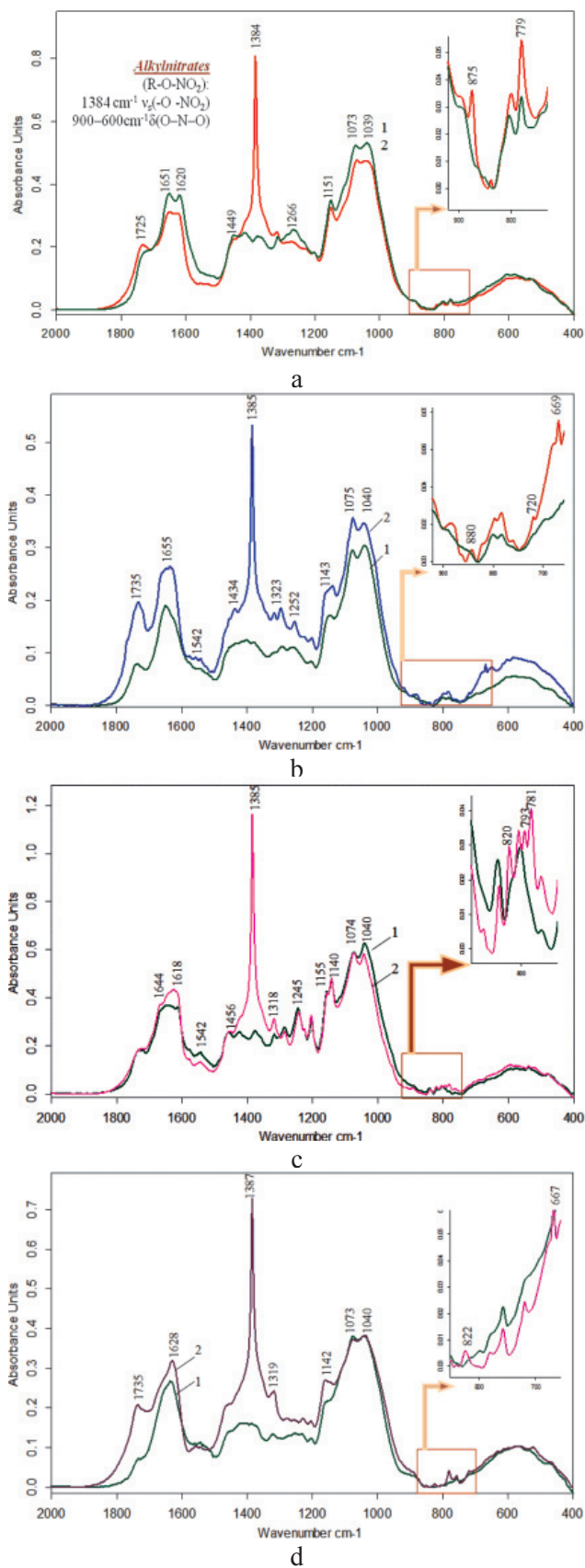


Рис. 1. ИК-спектры образцов *Hypogymnia physodes* (a), *Parmelia sulcata* (b), *Evernia mesomorpha* (c) и *Xanthotia parietina* (d):
1 – фоновой зоны; 2 – выдержанных над 0,5% HNO₃

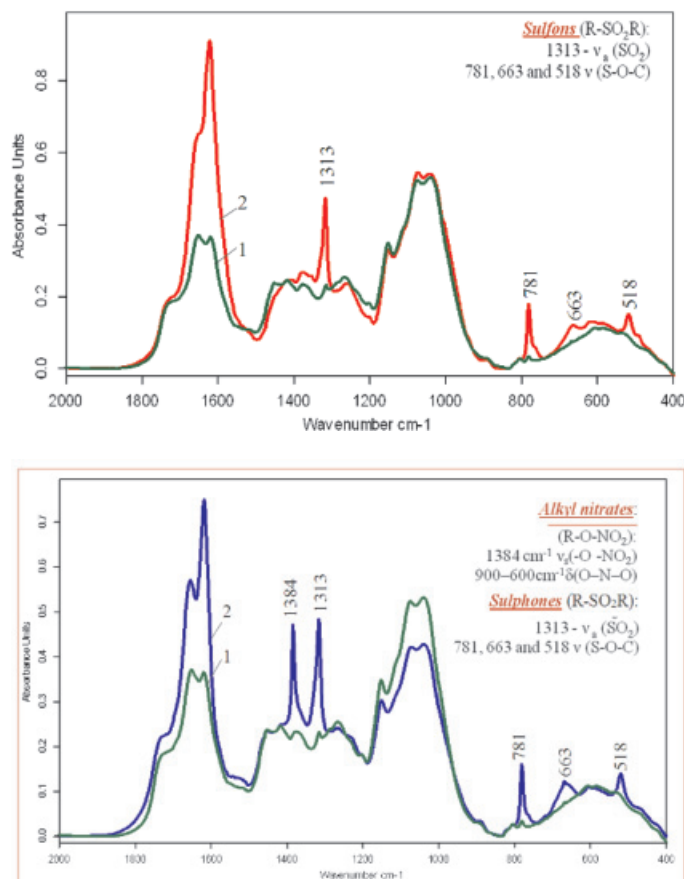


Рис. 2. ИК-спектры образцов *Hypogymnia physodes*:
 1 – фоновой зоны; 2 – выдержанных над 0,5% H₂SO₄; 3 – одновременно над 0,5% H₂SO₄ и HNO₃

Воздействие HNO₃ и H₂SO₄. Спектральный анализ образцов лишайников (13–14), испытывавших комбинированное воздействие паров двух кислот, показал изменения в химическом составе, связанные с образованием в нем 2-х типов соединений – сульфонов (R–SO₂R) и алкилнитратов (R–O–NO₂) (рис. 2). На сульфоны в лишайниках *Hypogymnia physodes* и *Parmelia sulcata* указывают полосы при 1318, 779, 666 и 520 см⁻¹; на алкилнитраты – 1384 см⁻¹. Экспонирование других видов лишайников (15–16) в аэрозоле двух кислот не выявило изменений в химическом составе, связанных с образованием сульфонов. В ИК-спектрах образцов *Evernia mesomorpha* (15) и *Xanthoria parietina* (16) отмечено слабое поглощение при 1384 см⁻¹, указывающее на присутствие алкилнитратов. Значение D₁₃₈₄/D₂₉₂₅ у *Evernia mesomorpha* и *Xanthoria parietina* низкое (0,84 и 0,83). В результате

комбинированного воздействия экотоксикантов у лишайников обнаружили внешние изменения слоевищ. В большей степени повреждены образцы среднеустойчивых к загрязнению видов. Голубовато-серая поверхность лопастей *Parmelia sulcata* становится грязновато-серой, появляются бурого и красно-коричневого цвета пятна. Серовато-зеленая верхняя поверхность лопастей *Hypogymnia physodes* приобретает грязновато-серый цвет, местами края лопастей бежевые. Наружные участки верхнего корового слоя имеют микротрещины. Внешние изменения образцов *E. mesomorpha* выражены в меньшей степени. Образцы *Xanthoria parietina* демонстрируют высокую толерантность к действию кислотного загрязнения. По степени чувствительности к комбинированному действию кислотных поллютантов можно выстроить следующий ряд:

Parmelia sulcata, *Hypogymnia physodes* – *Evernia mesomorpha* – *Xanthoria parietina*.

В биомониторинге загрязнения атмосферы данным типом загрязнения наилучшим образом подходят *P. sulcata*, *H. physodes*.

Воздействие HCl, HNO₃ и HCl, H₂SO₄ и HCl. Примером второго варианта воздействия поллютантов на лишайники

является действие HCl, а также ее сочетание с HNO₃ или H₂SO₄. При данном типе влияния в ИК спектрах лишайников не обнаружены изменения, связанные с поглощением поллютантов. Отсутствуют полосы поглощения, ответственные за накопление хлорсодержащих загрязняющих веществ при 1461 и 720 см⁻¹ ν(C-Cl) [7]. Отсутствие изменений в химическом составе лишайников сопряжено с существенными внешними изменениями слоевищ. Под действием HCl слоевища обесцвечивались, к концу эксперимента разрыхлялись, происходило ослизнение верхней и нижней коры, выполняющей защитную функцию, препятствуя доступу вредных соединений. Комбинированное действие HCl с другими кислотами оказывается токсичным для лишайников – все слоевища становятся грязновато-серые или бурые. На поверхности верхнего корового слоя многочисленны микротрещины и разрывы. В практике загрязнения атмосферы хлорсодержащими поллютантами низких концентраций использование данных индикаторных видов, скорее всего, нецелесообразно.



Токсичность экотоксикантов для лишайников в приведенном ряду возрастает.

Среди индикаторных видов наибольшие изменения в химическом составе характерны для двух среднеустойчивых к загрязнению видов – *Hypogymnia physodes* и *Parmelia sulcata*. В практике мониторинга кислотного загрязнения эти виды целесообразно использовать в качестве объектов исследования.

Идентификация атмосферного загрязнения с помощью Фурье-ИК-спектрального анализа. ИК-спектральный анализ образцов лишайников, произрастающих вблизи Тверских ТЭЦ (ТЭЦ-1, ТЭЦ-3 и ТЭЦ-4) и автомагистралей с интенсивным движением, позволил выявить в воздухе азот- и серосодержащие поллютанты – SO₂ и/или аэрозоль H₂SO₄, NO₂ и/или аэрозоль HNO₃. В образце *Hypogymnia physodes*, собранном вдоль Тверского проспекта, обнаружены алкилнитраты. В спектре лишайника (25) имеется сильное поглощение при 1384 см⁻¹, указывающее на загрязнение воздуха NO₂ и/или аэрозоль HNO₃ (рис. 3). Спектральный анализ лишайников собранных вдоль пр. Калинина и на пл. Гагарина показал наличие в них 2 соединений – алкилнитратов (1384 см⁻¹) и сульфонов (1313, 781, 666 и 518 см⁻¹). Появление сульфонов в лишайниках обусловлено деятельностью

Таким образом, ИК-спектры образцов лишайников отличаются при разных типах воздействия экотоксикантов. Можно выделить два основных варианта. Первый связан с адсорбцией слоевищем поллютанта и его взаимодействием с химическими компонентами лишайника. К этому типу относится действие на лишайники аэрозоля H₂SO₄, HNO₃, HNO₃ и H₂SO₄. При втором типе, поллютант не успевает адсорбироваться слоевищем и прореагировать с его химическими компонентами. Основной причиной является высокая токсичность поллютантов для лишайникового слоевища. Лишайниковое слоевище подвергается сильной деструкции, прежде чем начнется адсорбция поллютанта. Примером является действие хлорсодержащих соединений, а также их сочетание с другими экотоксикантами: HCl, HNO₃ и HCl, H₂SO₄ и HCl. Анализ действия поллютантов на лишайники (химические свойства соединений, образующиеся в слоевище, степень их воздействия, морфологические изменения, появление некроза) позволил выстроить ряд по степени токсичности для лишайников:

ТЭЦ-1 и ТЭЦ-4, которые в качестве топлива используют торф, мазут, в меньшей степени природный газ. Количественный анализ ИК-спектров образцов 26–27 показал разное содержание сульфонов. В образце 26 сульфонов больше (A₁₃₁₃/A₂₉₂₅ равно 1,16), чем алкилнитратов, а в образце 27, наоборот, больше алкилнитратов, чем сульфонов (A₁₃₁₃/A₂₉₂₅ равно 1,43). Разное расстояние ТЭЦ-1 от пр. Калинина, а также ТЭЦ-4 от пл. Гагарина определило различия в содержании сульфонов.

В районе функционирования ТЭЦ идентифицировано загрязнение воздуха SO₂ и/или аэрозоль H₂SO₄. В образцах 28–31 обнаружены только сульфоны. Количественные расчеты ИК-спектров образцов 28–31 показали разное содержание сульфонов в лишайниках. Высокое содержание сульфонов характерно для образцов, собранных возле ТЭЦ-1, низкое – ТЭЦ-3. Основные причины различий в содержании сульфонов является срок эксплуатации электростанций, структурное соотношение используемых видов топлива: торфа, угля, мазута, газа. Например, на самой старой ТЭЦ-1 (эксплуатация начата с 1912 г.) в качестве топлива преимущественно используют мазут, в меньшей степени природный газ. Относительно новые станции (ТЭЦ-3 и ТЭЦ-4) большую часть времени в году работают на природном газе.

Таким образом, с помощью спектрального анализа химического состава эпифитных лишайников удалось идентифи-

цировать загрязнение воздуха, уточнить источники загрязнения, определить содержание поллютантов в лишайниках.

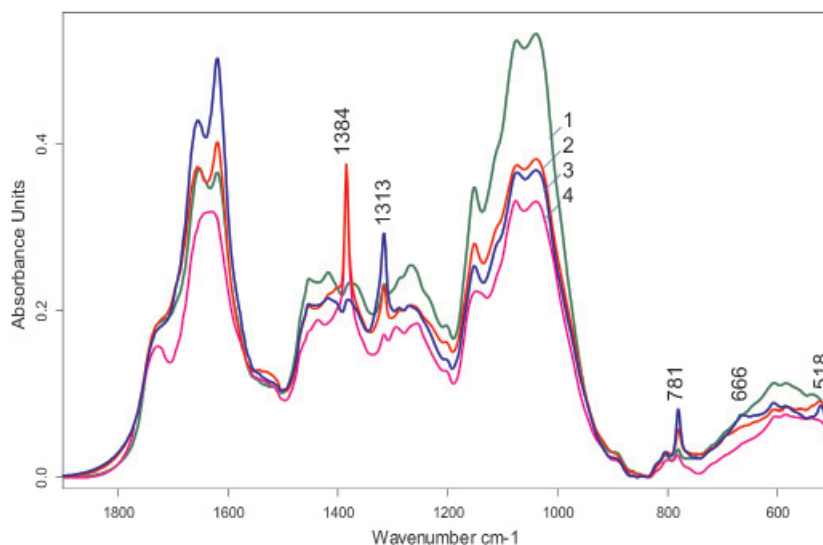


Рис. 3. ИК-спектры образцов *Hypogymnia physodes*, собранных в фоновой зоне (1) и на различных улицах города: 2 – Городском саду; 3 – пр. Калинина; 4 – Тверском пр.

Выводы

С помощью спектрального анализа установлен тип взаимодействия поллютантов с лишайниками. Хлорсодержащие соединения (HCl), а также их сочетание с HNO_3 и H_2SO_4 высокотоксичны для лишайников. Эти поллютанты не накапливаются слоевищем. Под их действием происходит быстрое разрушение слоевища. Под действием HNO_3 , H_2SO_4 , а также HNO_3 и H_2SO_4 в слоевищах образуются алкилнитраты, сульфоны, или и то и другое вместе. Выяснено, что наилучшей индикационной способностью обладают среднеустойчивые к загрязнению виды – *Hypogymnia physodes* и *Parmelia sulcata*. В спектрах этих видов отмечены существенные изменения. Изменения в химическом составе сопряжены с внешними изменениями окраса, структуры слоевищ. Эти виды целесообразно использовать в практике мониторинга на территории урбоэкосистем.

С помощью спектрального анализа *Hypogymnia physodes*, собранного на территории г. Твери, идентифицированы изученные группы экотоксикантов – азот- и серосодержащие соединения. На загрязнение воздуха H_2SO_4 в районах функционирования указывает наличие в лишайниках сульфонов. Алкилнитраты в лишайниках, собранных вдоль автострад, свидетельствуют о загрязнении воздуха HNO_3 . Присутствие в воздухе аэрозолей HNO_3 и H_2SO_4 характерно в районе дорог, проходящих вблизи

ТЭЦ. В образцах обнаружены алкилнитраты и сульфоны. Степень удаленности автодорог от ТЭЦ определяет разное содержание данных типов соединений. Полученные данные эксперимента и полевых исследований позволяют существенно скорректировать методику мониторинга кислотного загрязнения с использованием Фурье-ИК спектрального анализа лишайников.

Список литературы

1. Гальбрах Л.С. Целлюлоза и ее производные // Соров. образоват. журн. – 1996. – № 11. – С. 47–53.
2. Гольдовская Л.Ф. Химия окружающей среды. – М.: Мир, 2005. – 296 с.
3. Мейсунова А.Ф., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Лихеноиндикация аэротехногенного загрязнения с помощью Фурье-ИК спектрального анализа и трансплантации *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. // Вестник ТвГУ. Сер. Биология и экология. – 2010. Вып. 19. – С. 129–138.
4. ИК спектральные исследования воздействия сернистого газа на слоевище лишайника *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. и их практическое применение / А.Ф. Мейсунова, С.Д. Хижняк, С.М. Дементьева, П.М. Пахомов // Экологическая химия. – 2008. Т.17, Вып. 3. – С. 181–192.
5. Мейсунова А.Ф., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Спектроскопическое изучение воздействия окислов азота на слоевища лишайников *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. // Экологическая химия. – 2007. – Т. 16, № 4. – С. 27–35.
6. Методы исследования древесины и ее производных / под ред. Н.Г. Базарновой. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2002. – 160 с.
7. Трасс Х.Х. Классы полеотолерантности лишайников и экологический мониторинг // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 1985. –Т. 7. – С. 122–137.

8. Применение метода Фурье-ИК спектроскопии для лихеноиндикации атмосферного загрязнения в городских районах / А.Ф. Уразбахтина, С.Д. Хижняк, С.М. Дементьева, А.А. Нотов, П.М. Пахомов // Растительные ресурсы. – 2005. – Т. 41, вып. 2. – С. 139–147.

9. Экология города / под ред. А.С. Курбатова, В.Н. Башкина, Н.С. Касимова. – М.: Научный мир, 2004. – 624 с.

10. Infrared characteristic group frequencies. Tables and Charts / Ed. by G. Socrates. London: John Wiley & Sons, 1994. – 256 p.

11. Meysurova A.F., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. IR spectral analysis of the chemical composition of the lichen *Hypogymnia physodes* to assess atmospheric pollution // Jour. of Applied Spectroscopy. – 2009. – Vol. 76, № 3. – P. 420–426.

12. Meysurova A.F., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. IR spectroscopic study on indicator species of lichens for detection of nitrogen dioxide in atmosphere // Book of abstracts. 11th European Meeting on Environmental Chemistry – EMEC (Porto, Slovenia, December 8–11). – Nova Gorica University, 2010. – P. 30.

References

1. Galbrakh L.S. Tsellyuloza I ee proizvodnye // Sorov obrazovat. zhurn. 1996. no. 11. pp. 47–53.

2. Goldovskaya L.F. Khimiya okruzhayushchey sredy. M.: Mir, 2005. 296 p.

3. Meysurova A.F., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. Likhenoindikatsiya aerotekhnogenogo zagryazneniz s pomoshchyu Fure-ИК spektralnogo analiza I transplantatsii *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. // Vestnik TvGU. Ser. Biologiya i ekologiya. 2010. Vyp. 19. pp. 129–138.

4. Meysurova A.F., Khizhnyak S.D., Dementeva S.M., Pakhomov P.M. ИК spektralnye issledovaniya vozdeystviya sernistogo gaza na sloevische lishaynika *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. i ikh prakticheskoe primeneniye // Ekologicheskaya khimiya. 2008. T.17, vyp. 3. pp. 181–192.

5. Meysurova A.F., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. Spektroskopicheskoe izuchenie vozdeystviya okislov azota na

sloevische lishaynikov *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. // Ekologicheskaya khimiya. 2007. T. 16, no. 4. pp. 27–35.

6. Metody issledovaniya drevesiny i ee proizvodnye / Pod red. N.G. Bazarnovoy. Barnaul: Izd-vo Alt. gos. un-ta, 2002. 160 p.

7. Trass KH.KH. Klassy poleotolerantnosti lishaynikov i ekologicheskiy monitoring // Problemy ekologicheskogo monitoringa I modelirovaniya ekosistem. 1985. T. 7. pp. 122–137.

8. Urazbakhitina A.F., Khizhnyak S.D., Dementeva S.M., Notov A.A., Pakhomov P.M. Primeniye metoda Fure-ИК spektroskopii dlya likhenoindikatsii atmosfernogo zagryazneniz v gorodskikh rayonakh // Rastitelnye resursy. 2005. T. 41, vyp. 2. pp. 139–147.

9. Ekologiya goroda / Pod red. A.S. Kurbatova, V.N. Bashkina, N.S. Kasimova. M.: Nauchnyy mir, 2004. 624 p.

10. Infrared characteristic group frequencies. Tables and Charts / Ed. by G. Socrates. London: John Wiley & Sons, 1994. 256 p.

11. Meysurova A.F., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. IR spectral analysis of the chemical composition of the lichen *Hypogymnia physodes* to assess atmospheric pollution // Jour. of Applied Spectroscopy. 2009. Vol. 76, no. 3. pp. 420–426.

12. Meysurova A.F., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. IR spectroscopic study on indicator species of lichens for detection of nitrogen dioxide in atmosphere // Book of abstracts. 11th European Meeting on Environmental Chemistry EMEC (Porto, Slovenia, December 8–11). Nova Gorica University, 2010. pp. 30.

Рецензенты:

Тохтарь В.К., д.б.н., профессор, директор Ботанического сада, ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ БелГУ), г. Белгород;

Виноградова Ю.К., д.б.н., главный научный сотрудник ФГБУН «Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН», г. Москва.

Работа поступила в редакцию 03.09.2013.