

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 574.2: 582.34 (470.331)
DOI: 10.26456/vtbio323

ОЦЕНКА БИОИНДИКАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ *LESKEA POLYCARPA* HEDW. ПО ОТНОШЕНИЮ К АТМОСФЕРНЫМ ЗАГРЯЗНИТЕЛЯМ

А.А. Колонтаева¹, У.Н. Спирина^{1,2}

¹Тверской государственный университет, Тверь

²Главный Ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, Москва

Получены новые сведения о накопительных способностях эпифитного мха *Leskea polycarpa* Hedw. по отношению к углеводородам и соединениям азота и серы, которые представляют собой одни из основных загрязнителей атмосферного воздуха. В условиях *in vitro* выявлено, что ксилол в высокой концентрации вызывает резкие химические и морфологические изменения побегов. Обнаружено, что исследуемый объект обладает большей аккумуляционной способностью по отношению к соединениям азота по сравнению с соединениями серы. Интенсивность аккумуляции соединений азота возрастает при повышении концентрации поллютанта и температуры. С помощью Фурье-ИК спектрального анализа установлено соответствие между накоплением побегами *L. polycarpa* загрязняющих веществ в лабораторных и естественных условиях. Обосновано наличие у модельного вида потенциала использования в качестве биоиндикатора состояния атмосферного воздуха с помощью спектроскопических и визуальных методов.

Ключевые слова: биоиндикация, бриоиндикация, биотестирование, *Leskea polycarpa*, Фурье-ИК спектроскопия, атмосферное загрязнение.

Введение. Антропогенное воздействие из года в год наносит непоправимый ущерб состоянию окружающей среды. Как показали исследования, проведённые в апреле 2021 г., степень загрязнения атмосферы в г. Твери соответствует повышенному индексу. Загрязнению воздушного бассейна г. Твери преимущественно способствуют выхлопные газы автотранспорта и выбросы промышленных предприятий. Одними из основных поллютантов атмосферного воздуха г. Твери являются оксиды азота (NO_x), диоксид серы (SO₂) и углеводороды (Справка., 2021). Монооксид азота (NO) и углеводороды считаются приоритетными загрязняющими веществами, наличие и содержание которых в воздухе в первую очередь подлежит наблюдению и контролю. Неблагоприятная экологическая обстановка

ведёт к существенному ухудшению здоровья людей, что может поспособствовать снижению качества жизни населения и сокращению её продолжительности (Цыганов, 2019).

В связи с возрастанием трансформации среды, возникающей в процессе деятельности человека, появляется необходимость регулировать величину отрицательного антропогенного влияния на природную среду и вовремя принимать соответствующие меры по предотвращению её загрязнения. В данное время бриологами и экологами решаются вопросы о проведении биомониторинга и биоиндикации состояния окружающей среды с применением моховидных (Bryophyta s.l.). Биоиндикация с помощью бриофитов обладает высокой эффективностью благодаря высокой скорости размножения мхов, пойкилогидричности, большой поверхности для поглощения различных загрязнителей, мощной аккумуляционной способности и многим другим характеристикам (Вардуни и др., 2014; Radziemska et al., 2019).

Одним из высокоэффективных методов биоиндикации является Фурье-ИК спектральный анализ растительного материала, который позволяет выявить содержание накопленных в них химических соединений (Józwiak et al., 2014; Бревдо, Мейсурова, 2022). Однако методики работы с бриологическим материалом требуют уточнений, в связи с чем целесообразно выяснить, какие условия способствуют аккумуляции бриофитами различных поллютантов, а также определить, по отношению к каким из них используемый вид-биоиндикатор обладает большей накопительной способностью.

Цель работы – изучить возможности использования *Leskea polycarpa* Hedw. для оценки атмосферного загрязнения в условиях г. Твери. Задачи: 1) оценить степень чувствительности модельного объекта к воздействию кислот и ксилола в условиях *in vitro* методами ИК-спектроскопии; 2) провести сравнительный анализ содержания соединений азота, серы и токсических углеводов в образцах *Leskea polycarpa* из модельных участков г. Твери, отличающихся уровнем атмосферного загрязнения; 3) проанализировать возможности использования *Leskea polycarpa* для оценки атмосферного загрязнения города.

Материалы и методы. Исследования проводились в весенне-летне-осенний период 2021 г. в лаборатории ЦКП ФГБОУ ВПО «Тверской государственной университет» (Колонтаева, 2022). В качестве объекта исследований использовались образцы эпифитного мха *L. polycarpa*. Сбор образцов производился в пунктах отбора на территории г. Твери, отличающихся высоким уровнем антропогенной нагрузки (рис. 1, табл. 1), и в фоновой зоне, расположенной в 60 км от

города Твери, для сравнительного анализа (д. Ферязкино, Калининский район Тверской области). Данная зона считается экологически чистой (Мейсунова и др., 2011).

Для эксперимента *in vitro* были взяты образцы, собранные в парке Текстильщиков, так ИК-спектры образцов, собранных в этом пункте отбора, демонстрируют небольшие отличия от ИК-спектра образца из фоновой зоны, несмотря на повышенную антропогенную нагрузку (Мейсунова и др., 2016). Кроме того, на данной территории объект исследования встречается достаточно часто. Это позволяет отобрать количество образцов, необходимое для эксперимента.



Рис. 1. Карта пунктов отбора образцов *L. polycarpa*: 1 – Парк Победы; 2 – Первомайская роща; 3 - Московское шоссе; 4 – Сахаровское шоссе; 5 – набережная Афанасия Никитина; 6 - ландшафтный парк «Гьмака»; э – энергетическая отрасль; м – машиностроение; п – полиграфическая отрасль; л – лёгкая промышленность; х – химическая промышленность; о – производство окон из ПВХ; с – стекольная промышленность

Таблица 1

Общая характеристика пунктов отбора образцов *L. polycarpa* в г. Твери

№ ПО	Координаты ПО	Наименование	Потенциальные источники	
			промышленность	транспорт
1	56.84738 с.ш. 35.91458 в.д.	Парк Победы	лёгкая промышленность: ОАО «Тверская швейная фабрика»	автотранспорт
2	56.8435 с.ш. 35.82637 в.д.	ул. Маршала Конева, проезжая часть рядом с Первомайской рощей	энергетическая отрасль: Тверская ТЭЦ-1; машиностроение: ООО «ЭЛТОР», ООО «Тверьстроймаш», ООО «ЖБИ-1»;	автотранспорт

			<i>полиграфическая отрасль: ОАО «Тверской полиграфический комбинат» (Мейсурова и др., 2022)</i>	
3	56.84199 с.ш. 35.95368 в.д.	Московское шоссе	<i>химическая промышленность: ООО «Тверской Завод Искусственных Кож»; производство окон из ПВХ и пр.: ООО «ТМК»; машиностроение: ОАО «Тверской экскаваторный завод»; энергетическая отрасль: Тверская ТЭЦ-4</i>	автотранспорт
4	56.86547 с.ш. 35.9687 в.д.	Сахаровское шоссе	<i>стеклянная промышленность: ООО "Тверской Стекольный Завод"</i>	автотранспорт
5	56.86499 с.ш. 35.90849 в.д.	Набережная Афанасия Никитина	-	автотранспорт, речной транспорт
6	56.85379 с.ш. 35.89508 в.д.	Ландшафтный парк «Тьмака»	-	автотранспорт

Эксперименты по моделированию загрязнения воздушной среды в лабораторных условиях проводили на основе ранее разработанной схемы моделирования загрязнения, проведенной с использованием эпифитных лишайников (Мейсурова и др., 2011, 2016; Мейсурова, 2014). Свежесобранные образцы прикреплялись к крышкам и стенкам 3 эксикаторов объемом 0,5 л, после чего на их дно наливалось 20 мл азотной кислоты (HNO_3) определённой концентрации. После эксикаторы помещались в разные температурные условия – +7, +22, и +26 °С, с целью оценки влияния температуры на интенсивность аккумуляционных процессов. Аналогично выполнялся эксперимент с использованием серной кислоты (H_2SO_4) (табл. 2). Выбор используемых поллютантов определён тем, что во влажном воздухе диоксид азота (NO_2) и диоксид серы (SO_2) имеют свойство

превращаться в токсичные соединения – HNO_3 и H_2SO_4 соответственно. Для эксперимента использовались, в том числе, высокие концентрации кислот для получения быстрого эффекта от их влияния (Мейсунова и др., 2016).

Таблица 2

Схема эксперимента по воздействию поллютантов

№	Наименование поллютанта	С*, %	Объем реактивов	
			V** _{кк} мл	Vводы мл
1	HNO_3	0,5	0,1	19,9
		2	0,4	19,6
		8	1,6	18,4
2	H_2SO_4	0,5	0,1	19,9
		8	1,6	18,4

Примечания: *С – концентрация поллютанта; **V_{кк} – объем концентрированной кислоты.

Также образцы мха подвергались воздействию паров такого органического химического соединения, как ксилол (при температуре +22 °С). Данный поллютант является компонентом выбросов автотранспорта. При этом ксилол может образовывать наибольшие приземные концентрации при неблагоприятных погодных условиях (Магдеева и др., 2016). Для эксперимента использовались эксикаторы объемом 3 литра, на дно которых наливалось 120 мл вещества.

Экспозиция образцов в эксикаторах происходила в течение 7 дней. Далее проводился Фурье-ИК спектральный анализ образцов по стандартной методике (Мейсунова и др., 2016). Пробоподготовка материала состояла в его предварительном высушивании в сухожаровом шкафу, за которым следовало изготовление таблеток с бромидом калия (Егоров, Шагалов, 2012). ИК-спектры образцов регистрировались на Фурье-ИК спектрометре ФМС-1202 фирмы Инфраспек при помощи программного обеспечения для прибора (в компьютерной программе FSpec) в диапазоне 450 - 4000 см^{-1} , разрешение составляло 4 см^{-1} , количество сканов при каждом измерении – 35. Затем происходила обработка спектров с помощью программы Origin 8 (OriginLab Corp.). Интерпретация осуществлялась в диапазоне 1800–400 см^{-1} , который представляет собой область «отпечатков пальцев» (fingerprint region) (Мейсунова, 2014), при помощи сводной таблицы характеристических групповых частот (Казицина, Куплетская, 2013; Самсонова, 2016), также учитывались результаты спектрального анализа биологического материала других исследователей (Bulgariu et al., 2009; Мейсунова и др., 2010, 2011, 2016; Cao et al., 2014, 2017; Kļaviņa, 2018).

Результаты и обсуждение. ИК-спектр образца *L. polycarpa*, собранного в фоновой зоне, преимущественно демонстрирует наличие колебаний на частотах, соответствующих органическим соединениям, входящим в состав растительного материала. Полосы поглощения, свидетельствующие о накоплении атмосферных загрязнителей, отсутствуют. В ИК-спектрах образцов из парка Текстильщиков так же не обнаружены значительные изменения в химическом составе (рис. 2).

В ИК-спектрах образцов наблюдается повышение интенсивности полосы поглощения на частоте $\sim 1730 \text{ см}^{-1}$, что вызвано валентными колебаниями карбонильной группы (C=O) (Vulgariu et al., 2009; Мейсурова и др., 2016) в несопряженных кетонах. По этой полосе определяют карбонилы в насыщенных сложноэфирных группах и углеводы (гемицеллюлоза, пектин) (Klavıřa, 2018). О наличии в образце целлюлозы, олигосахаридов и гликопротеинов свидетельствуют валентные колебания C–O при $\sim 1060 \text{ см}^{-1}$ (Cao et al., 2014).

Полоса поглощения при $\sim 1640 \text{ см}^{-1}$ вызвана деформационными колебаниями в плоскости молекулы (C=O), что обусловлено присутствием амида (Cao et al., 2017). Амидные полосы наблюдаются также на частотах ~ 1420 , ~ 1380 и $\sim 1250 \text{ см}^{-1}$ (валентные колебания C–H и C–N) (Cao et al., 2014, 2017).

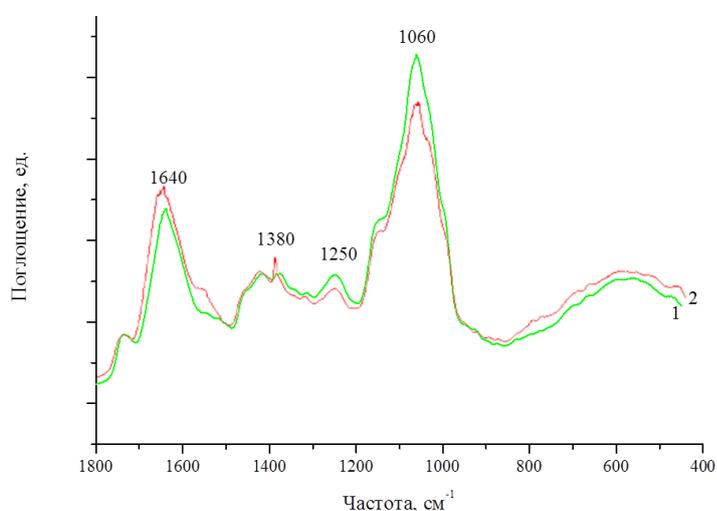


Рис. 2. ИК-спектры поглощения образцов *L. polycarpa*: 1 – из фоновой зоны; 2 – из парка Текстильщиков

Результаты ИК спектрального анализа образцов в результате модельного воздействия загрязнителей

После воздействия HNO_3 (2%) при температуре $+26^\circ\text{C}$ в

образцах отмечаются небольшие колебания на частотах 797 и 779 см^{-1} . Однако основная полоса, свидетельствующая об образовании алкилнитратов (1385 см^{-1}), отсутствует. Пары HNO_3 (8%) при температурах +22 и +26 $^{\circ}\text{C}$ вызывают появление алкилнитратов (R–O–NO₂), на что указывают полосы при 779 и 1385 см^{-1} (Мейсурова и др., 2016). Наблюдаются изменения в ИК-спектрах образцов, связанные с увеличением содержания белкового компонента (Амид II, 1545 см^{-1}) (Мейсурова и др., 2010; Казицина, Куплетская, 2013) (рис. 3).

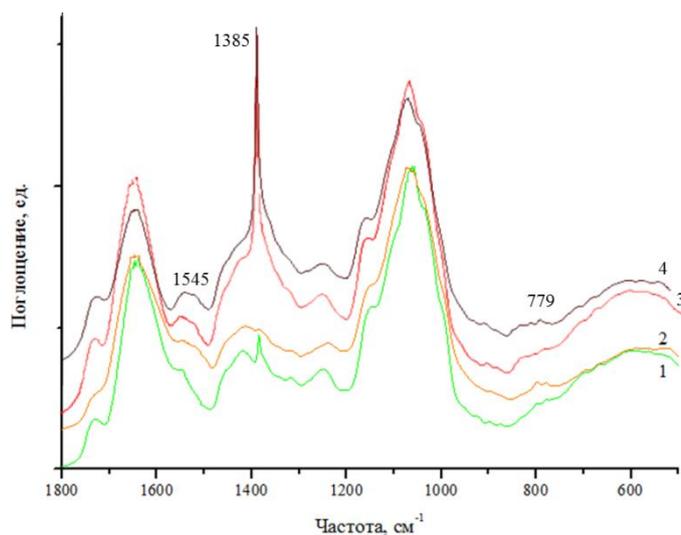


Рис. 3. ИК-спектры поглощения образцов *L. polycarpa*: 1 – контроль; 2 – образец, испытавший воздействие HNO_3 (2%) при +26 $^{\circ}\text{C}$; HNO_3 (8%) при +22 $^{\circ}\text{C}$ (3); HNO_3 (8%) при +26 $^{\circ}\text{C}$ (4)

Под действием серной кислоты в условиях эксперимента в химическом составе образцов не возникает изменений.

Ксилол относится к числу простейших ароматических углеводородов (аренов), и после его воздействия в ИК-спектре отслеживаются пики, указывающие на колебания ароматического кольца (1453 см^{-1}) и неплоские деформационные колебания C—H (890 и 700 см^{-1}) (Казицина, Куплетская, 2013; Самсонова, 2016) (рис. 4).

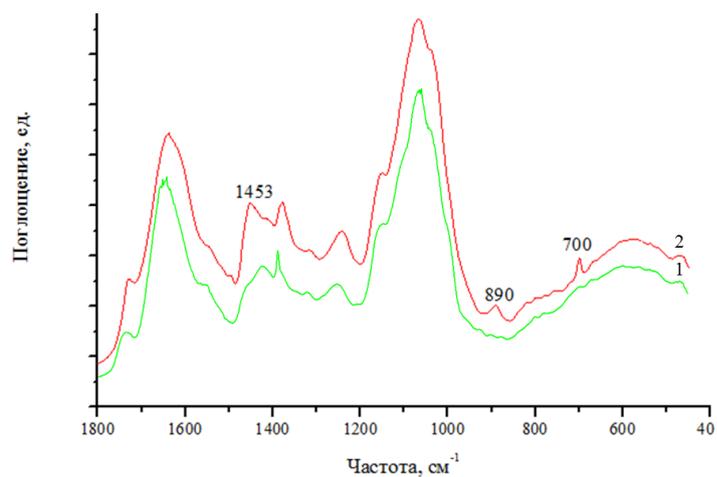


Рис. 4. ИК-спектры поглощения образцов *L. polycarpa*: 1 – контроль; 2 – образец, испытавший воздействие ксилола

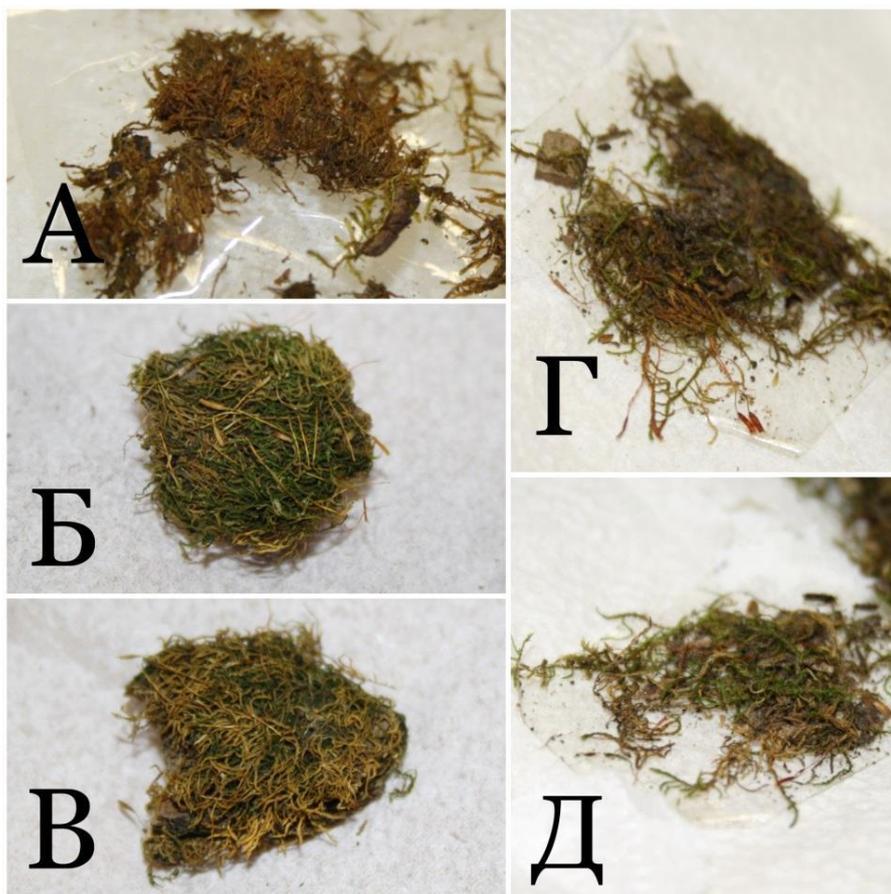


Рис. 5. Образцы *L. polycarpa* после воздействия паров поллютантов: А – ксилола; Б – HNO_3 (8%) при температуре $+22^\circ\text{C}$; HNO_3 (8%) при $+26^\circ\text{C}$ (В); H_2SO_4 (0,5%) при $+22^\circ\text{C}$ (Г); H_2SO_4 (0,5%) при $+26^\circ\text{C}$ (Д) (фото авторов)

Что касается морфологических изменений, видимых невооружённым глазом, то они наблюдаются для образцов, которые были подвергнуты воздействию паров ксилола (рис. 5А), HNO_3 (8%) при температурах 22°C (рис. 5Б) и 26°C (рис. 5В), H_2SO_4 (0,5%) при температурах 22°C (рис. 5Г) и 26°C (рис. 5Д). После испытания побегами влияния паров вышеперечисленных экотоксикантов отмечается их пожелтение. В результате влияния паров ксилола побеги становятся липкими и приобретают блестящий оттенок.

HNO_3 в низких концентрациях (0,5 и 2 %) и H_2SO_4 в высокой концентрации (8%) практически не вызывают морфологических изменений у побегов (рис. 6).

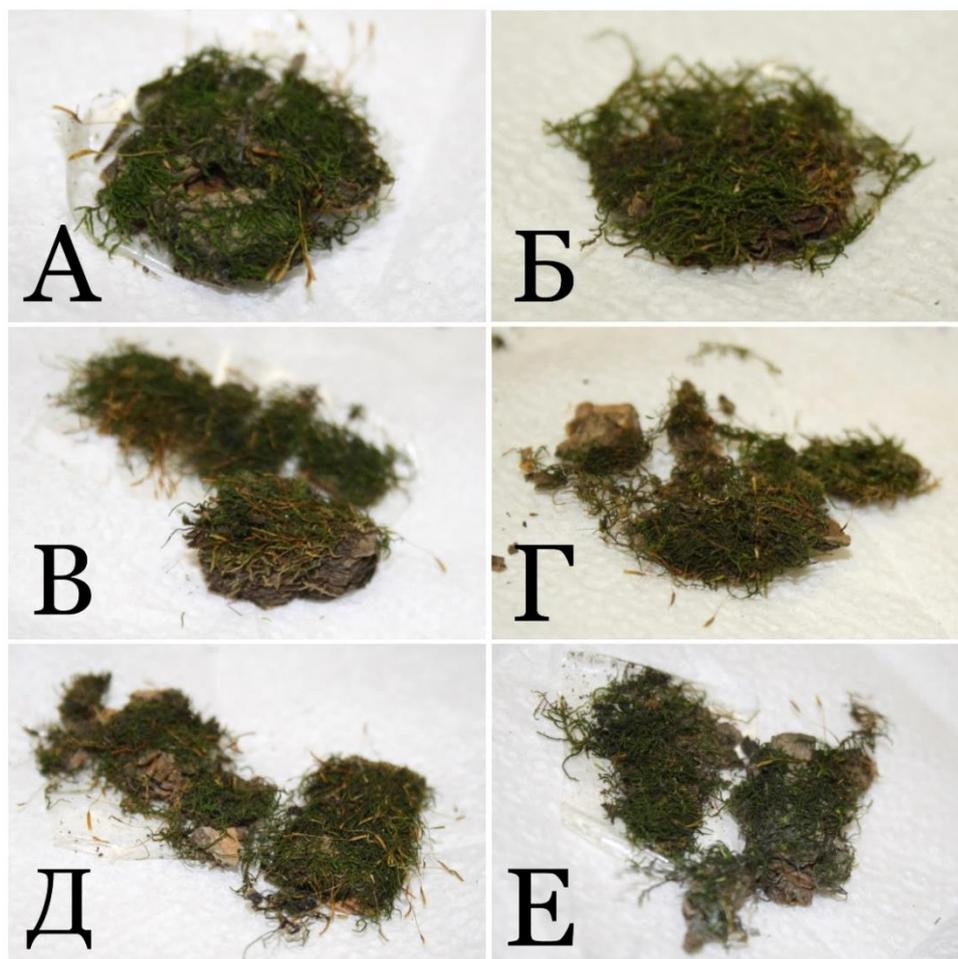


Рис. 6. Образцы *L. polycarpa* после воздействия паров загрязнителей:
А – HNO_3 (0,5%) при температуре +22°C; Б – HNO_3 (0,5%) при температуре +26°C (Б); HNO_3 (2%) при +22°C (В); HNO_3 (2%) при +26°C (Г); H_2SO_4 (8%) при +22°C (Д); H_2SO_4 (8%) при +26°C (Е) (фото авторов)

Результаты ИК спектрального анализа образцов, собранных в пунктах отбора на территории города Твери

Сравнение ИК-спектров образцов, собранных в разных районах г. Твери, с образцами из фоновой зоны, показало изменения, связанные с накоплением поллютантов. В ИК-спектрах обнаружены изменения на частотах 1385 см^{-1} , что подтверждает наличие в побегах *L. polycarpa* алкилнитратов (R–O–NO₂) (рис. 7, 8).

ИК-спектр образца из Парка Победы преимущественно демонстрирует накопление соединений азота ($1385, 779\text{ см}^{-1}$ - алкилнитраты). Также возрастает пик полосы поглощения на $\sim 1730\text{ см}^{-1}$, вызванный колебанием карбонильной группы (C=O) (рис. 7). Эти изменения обнаружены и в ИК-спектре образца, собранного в Ландшафтном парке «Тьмака» (рис. 8).

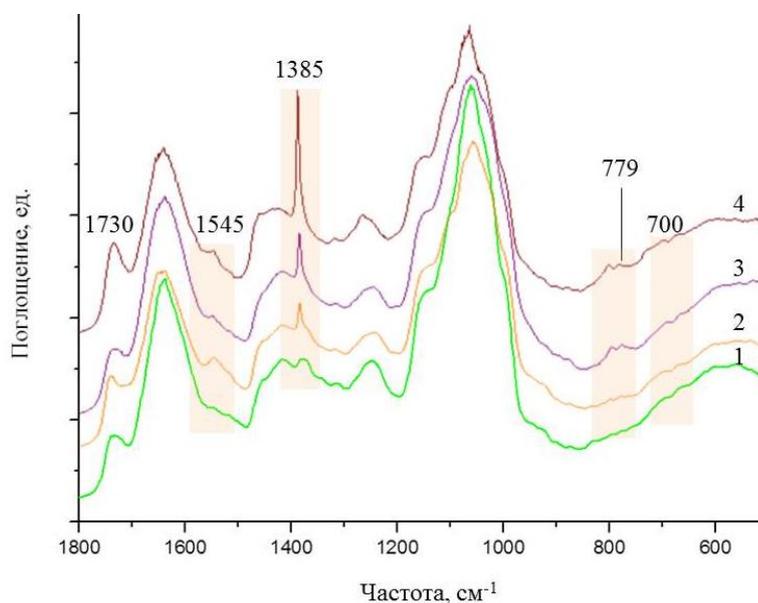


Рис. 7. ИК-спектры поглощения образцов *L. polycarpa*: 1 – фоновая зона; 2 – Парк Победы; 3 – проезжая часть рядом с Первомайской рошей; 4 – Московское шоссе

В ИК-спектре образца из Первомайской роши зафиксированы изменения, указывающие на наличие в растительном материале алкилнитратов ($1385, 779\text{ см}^{-1}$) (рис. 7).

При расшифровке ИК-спектра растительного материала, отобранного вдоль Московского шоссе, отмечены полосы при 1385 и 779 см^{-1} (алкилнитраты), а также 700 см^{-1} (неплоские деформационные колебания C–H) (рис. 7).

В образцах, собранных вдоль Сахаровского шоссе и

набережной Афанасия Никитина, обнаруживаются изменения, связанные с наличием алкилнитратов ($1385, 779 \text{ см}^{-1}$) (рис. 8).

В образце из Ландшафтного парка «Тьмака» наблюдается наличие полос поглощения, указывающих на присутствие алкилнитратов (1385 см^{-1}) и органических соединений ($\sim 1460 \text{ см}^{-1}$ – колебания ароматического кольца; $\sim 1122 \text{ см}^{-1}$ – плоские деформационные колебания С-Н; ~ 745 и $\sim 705 \text{ см}^{-1}$ – неплоские деформационные колебания С-Н), а также изменение на полосе $\sim 1275 \text{ см}^{-1}$ (Амид III) (рис. 8). В образцах из остальных пунктов отбора, как и в условиях модельного эксперимента с HNO_3 , отслеживается изменение на $\sim 1545 \text{ см}^{-1}$ (Амид II) (рис. 7, 8) (Мейсурова и др., 2010; Казицина, Куpletская, 2013).

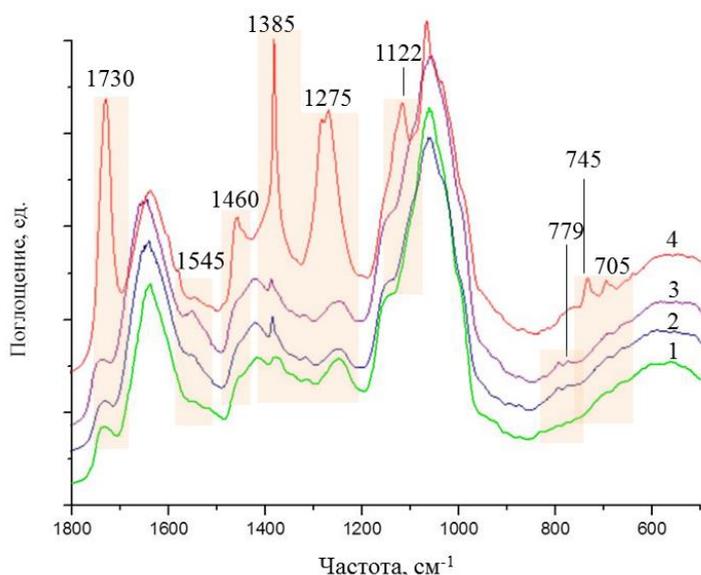


Рис. 8. ИК-спектры поглощения образцов *L. polycarpa*: 1 – фоновая зона; 2 – Сахаровское шоссе; 3 – Набережная Афанасия Никитина; 4 – Ландшафтный парк «Тьмака»

При сравнении ИК-спектров образца из фоновой зоны и образца, собранного в парке Текстильщиков, не обнаруживается значительного накопления поллютантов в растительном материале. Возможно, это обусловлено сбором образцов в отдалённой от ТЭЦ-1 части парка, использованием ТЭЦ-1 относительно чистого топлива, природного газа (Тверская., 2023), в период роста побегов, а также особенностями розы ветров в данный промежуток времени, в связи с чем побеги не подвергались осаждению выбросов.

Спектральный анализ образцов, которые подвергались воздействию паров HNO_3 , демонстрирует достаточно сильные изменения в химическом составе растительного материала. Следует

отметить, что процесс образования алкилнитратов интенсифицируется с повышением температуры и концентрации HNO_3 (рис. 3). Это даёт возможность предположить, что в естественных условиях при повышении температуры и, соответственно, скорости метаболических процессов, исследуемый объект аккумулирует соединения азота более активно. Однако основной причиной этому может быть повышение скорости испарения HNO_3 под действием более высокой температуры *in vitro*.

После воздействия ксилола на образцы модельного вида в ИК-спектрах отмечаются интенсивные полосы поглощения, связанные с колебаниями ароматического кольца и С-Н связей (рис. 4). Предположительно, значительные изменения в ИК-спектре возникли в результате интенсивного испарения поллютанта при положительной температуре и оседания паров на поверхность побегов, о чём свидетельствует их блеск и клейковатость. В естественных условиях при наличии ксилола в воздухе, наиболее вероятно, будут происходить процессы деструкции основных компонентов химического состава растения, однако эффективный процесс аккумуляции исключительно данного вещества невозможен из-за малорастворимости аренов в воде (Мейсунова и др., 2016). ИК-спектр образца из ландшафтного парка «Тьмака» демонстрирует колебания, соответствующие ароматическим соединениям, что может быть отражением присутствия в воздухе нескольких летучих органических соединений, входящих в состав выхлопных газов автомобилей (Магдеева и др., 2016) и воздействующих на растительный материал в течение длительного времени (рис. 8).

Пары азотной кислоты высокой концентрации (8%) и серной кислоты в концентрации 0,5% (при температурах +22 и +26°C) вызывают существенные морфологические изменения, заключающиеся в потере зелёной окраски, возможно, являющейся следствием деструкции хлоропластов (рис. 5), однако более высокая концентрация H_2SO_4 такого влияния не оказывает (рис. 6).

Полученные в ходе модельных экспериментов данные об аккумуляционных способностях *L. polycarpa* по отношению к исследуемым поллютантам совпадают с результатами ИК-спектрального анализа растительного материала, собранного на урбанизированной территории (рис. 7, 8). В условиях *in vitro* серная кислота, в отличие от азотной, не вызывает изменений в ИК-спектрах образцов *L. polycarpa* ни в низкой, ни в высокой концентрациях.

При анализе ИК-спектров образцов, собранных на антропогенно-трансформированных территориях, наблюдаются изменения при $\sim 1730 \text{ см}^{-1}$ (рис. 7, 8). Полоса при 1735 см^{-1} была обнаружена после воздействия нитрата аммония (NH_4NO_3) на

лишайники в лабораторных условиях (Мейсунова и др., 2016). В связи с этим, целесообразно проведение модельных экспериментов по воздействию данного поллютанта на химический состав образцов *L. polycarpa* в дальнейшем для достоверной интерпретации этой полосы поглощения в ИК-спектрах мха модельного вида.

Изменения в ИК-спектрах, возникшие при $\sim 1545 \text{ см}^{-1}$ (Амид II) и $\sim 1275 \text{ см}^{-1}$ (Амид III) связаны с усилением синтеза белкового компонента по причине накопления побегами экзогенного азота (Мейсунова и др., 2010; Казицина, Куплетская, 2013) (рис. 3, 7, 8).

Выводы. В экспериментах *in vitro* *L. polycarpa* обладает сравнительно высокой накопительной способностью по отношению к азотной кислоте и низкой – по отношению к серной кислоте. При повышении температуры и концентрации азотной кислоты интенсивность накопления побегами соединений азота повышается. Высокая концентрация ксилола *in vitro* вызывает значительные химические и морфологические изменения побегов растения.

Фурье-ИК спектральный анализ демонстрирует содержание соединений азота, а также органических соединений в образцах из исследуемых участков г. Твери. Накопления соединений азота обнаружены на территории парка «Тьмака» (1385 см^{-1} – алкилнитраты), Парка Победы, Первомайской рожи, Московского шоссе, набережной Афанасия Никитина и Сахаровского шоссе ($1385, 779 \text{ см}^{-1}$ – алкилнитраты). Значительное органическое загрязнение обнаружено на территории парка «Тьмака» ($\sim 1460 \text{ см}^{-1}$ – колебания ароматического кольца; $\sim 1122 \text{ см}^{-1}$ – плоские деформационные колебания C-H; ~ 745 и $\sim 705 \text{ см}^{-1}$ – неплоские деформационные колебания C-H) и Московского шоссе ($\sim 700 \text{ см}^{-1}$ – неплоские деформационные колебания C—H).

Значительные химические и морфологические изменения в образцах *L. polycarpa*, наблюдаемые в экспериментах *in vitro*, свидетельствуют о возможности использования данного вида для оценки атмосферного загрязнения города с использованием спектроскопических и визуальных методов анализа биологических объектов.

Авторы выражают глубокую благодарность инженеру-лаборанту ЦКП «Лаборатория биотехнологических измерений» Тарасовой Екатерине Михайловне за помощь при проведении модельных экспериментов и декану биологического факультета ТвГУ, заведующей кафедрой ботаники Мейсуновой Александре Фёдоровне за помощь в интерпретации полученных результатов.

Список литературы

- Бревдо Е.Ю., Мейсунова А.Ф.* 2022. Биоиндикационные возможности мха *Nyholmia obtusifolia* при оценке состояния воздушной среды // Вестник Тверского государственного университета. Сер.: Биология и экология. № 3 (67). С. 145-156.
- Вардуни Т.В., Минкина Т.М., Бураева Е.А., Горбов С.Н., Манджиева С.С., Омельченко Г.В., Шиманская Е.И., Вьюхина А.А., Сушкова С.Н.* 2014. Особенности аккумуляции радионуклидов наземными мхами в зоне многолетнего техногенного воздействия, на примере Пилезии многоцветковой [Электронный ресурс] // Научный журнал КубГАУ. Электрон. журн. №101(07). С. 151-165.
- Егоров Н.Б., Шагалов В.В.* 2012. Инфракрасная спектроскопия редких и рассеянных элементов. Методические указания к проведению лабораторных работ по курсу «Физико-химические методы анализа» для магистров, обучающихся по программе «Технология материалов современной энергетики» и для студентов, обучающихся по специальности 240601 «Химическая технология материалов современной энергетики» // Томск: Изд-во ТПУ. 20 с.
- Казыцина Л.А., Куплетская Н.Б.* 2013. Применение УФ-, ИК-, ЯМР-спектроскопии в органической химии. М.: Рипол Классик. С. 268.
- Колонтаева А.А.* 2022. Оценка биоиндикационных способностей *Leskea polycarpa* Hedw. по отношению к атмосферным загрязнителям // Материалы XX научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, апрель 2022 года: Сб. ст. Тверь: Твер. гос. ун-т. С. 96 – 98.
- Магдеева А.Р., Шагидуллин А.Р., Гилязова А.Ф., Амирьянова Г.Ф., Шагидуллин Р.Р.* 2016. Анализ структуры выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта на территории г. Казани // Российский журнал прикладной экологии. №1 (5). С. 33-37.
- Мейсунова А.Ф.* 2014. Биомониторинг атмосферного воздуха с использованием ИК спектрального анализа индикаторных видов лишайников (на примере Тверской области): автореф. дис. ... д-ра биол. наук; спец. 03.02.08. Тверь. 43 с.
- Мейсунова А.Ф., Суворова А.А., Бревдо Е.Ю.* 2022. Сравнительный анализ содержания фотосинтетических пигментов у некоторых видов мхов в рекреационных зонах города Твери // Вестник Тверского государственного университета. Сер.: Биология и экология. № 3(67). С. 157-169.
- Мейсунова А.Ф., Хижняк С.Д., Пахомов П.М.* 2010. Характер воздействия азотсодержащих поллютантов на химический состав *Hypogymnia physodes* // Вестник Тверского государственного университета. Сер.: Биология и экология. № 18. С. 129-136.
- Мейсунова А.Ф., Хижняк С.Д., Пахомов П.М.* 2011. Оценка токсичного воздействия диоксидов азота и серы на химический состав *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. ИК-спектральный анализ // Сибирский экологический журнал. Т. 18. №. 2. С. 251-261.
- Мейсунова А.Ф., Хижняк С.Д., Пахомов П.М.* 2016. Фурье-ИК спектральный

- анализ атмосферного загрязнения с использованием лишайников. Тверь: Твер. гос. ун-т. 155 с.
- Самсонова Л.Г. 2016. Применение ИК и ПМР спектроскопии при изучении строения органических молекул. Учебно-методическое пособие. Томск: Изд. Дом ТГУ. 60 с.
- Справка о состоянии окружающей среды в Тверской области в апреле 2021 г. [Электронный ресурс]. 2021 // Тверской ЦГМС. – Режим доступа: <http://www.tvermeteo.ru/labor/2021-04.pdf>
- Тверская ТЭЦ-1 [Электронный ресурс]. 2023 // Общество с ограниченной ответственностью "Тверская Генерация" – Режим доступа: <https://tvgen.ru/unit/view/1>
- Цыганов А.А. 2019. Оценка состояния окружающей среды города Твери // Вестник ТвГУ. Сер.: География и геоэкология. № 2(26). С.56-77
- Bulgariu L., Ratoi M., Bulgariu D., Macoveanu M. 2009. Adsorption potential of mercury(II) from aqueous solutions onto Romanian peat moss [Электронный ресурс] // Journal of Environmental Science and Health Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering. Электрон. журн. 44(7). P. 700-706. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/24399226_Adsorption_potential_of_mercuryII_from_aqueous_solutions_onto_Romanian_peat_moss#pf4
- Cao Z., Liu Y., Jiancheng Zhao J. 2014. Efficient Discrimination of Some Moss Species by Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Chemometrics // Journal of Spectroscopy. 9 p.
- Cao Z., Wang Z., Shang Z., Zhao J. 2017. Classification and identification of *Rhodobryum roseum* Limpr. and its adulterants based on fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and chemometrics [Электронный ресурс] // PLoS ONE. Электрон. журн. 12(2). 14 p. Режим доступа: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172359>
- Jóźwiak M.A., Rybiński P., Jóźwiak M. 2014. Bio-Indicative Assessment of Motorway Air Pollution Using Thermal Analysis // Pol. J. Environ. Stud. Vol. 23. №. 5. P. 1617-1625
- Kļaviņa L. 2018. Composition of mosses, their metabolites and environmental stress impacts: дис. ... д-ра биол. наук. Рига, Латвия. 130 с.
- Origin. Версия 8 : программа. 2007 // OriginLab Corporation, Нортгемптон, Лицензия: пробная версия. Режим доступа: <https://www.originlab.com/>
- Radziemska M., Mazur Z., Bes A., Majewski G., Gusiatin Z. M., Brtnicky M. 2019. Using Mosses as Bioindicators of Potentially Toxic Element Contamination in Ecologically Valuable Areas Located in the Vicinity of a Road: A Case Study [Электронный ресурс] // International Journal of Environmental Research and Public Health. Электрон. журн. 16(20): 3963. Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/ijerph16203963>

ASSESSMENT OF BIOINDICATIVE ABILITIES OF *LESKEA POLYCARPA* HEDW. IN RELATION TO ATMOSPHERIC POLLUTANTS

A.A. Kolontaeva¹, U.N. Spirina^{1,2}

¹Tver State University, Tver

²Tsitsin Main Botanical Garden RAS, Moscow

Epiphytic bryophytes are considered being sensitive and reliable indicators of air pollution. Accumulation abilities of *Leskea polycarpa* were studied and new data were obtained for hydrocarbons, nitrogen and sulfur compounds, which are among the main pollutants of atmospheric air. According to *in vitro* experiments, high concentration of xylene cause significant chemical and morphological changes in shoots. It was found that *L. polycarpa* accumulates nitrogen compounds better than sulfur ones. The intensity of accumulation of nitrogen compounds is directly proportional to the concentration of pollutants and temperature. FTIR analysis showed similar trends in the chemical composition changes of *L. polycarpa* occurring during *in vitro* experiments and in the natural habitats with anthropogenic air pollution sources. The possibility of using *L. polycarpa* as a bioindicator of air pollution was confirmed using both spectroscopic and visual methods.

Keywords: *bioindication, bryoindication, biotesting, Leskea polycarpa, FTIR spectroscopy, air pollution.*

Об авторах:

КОЛОНТАЕВА Анна Аделиновна – магистрант направления 06.04.01 Экология, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: annakolontaeva00.com@gmail.com.

СПИРИНА Ульяна Николаевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», старший научный сотрудник лаборатории Гербарий ГБС РАН, 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: Spirina.UN@tversu.ru.

Колонтаева, А.А. Оценка биоиндикационных возможностей *Leskea polycarpa* Hedw. по отношению к атмосферным загрязнителям / А.А. Колонтаева, У.Н. Спирина // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. 2023. № 3(71). С. 111-126.

Дата поступления рукописи в редакцию: 20.04.23

Дата подписания рукописи в печать: 04.09.23