

**Содержание фотосинтетических пигментов в талломах
Parmelia sulcata Taylor в рекреационных зонах города Твери и
Спировском районе Тверской области**

The content of photosynthetic pigments in thallomas of *Parmelia sulcata* Taylor in recreational areas of the city of Tver and the Spirovsky district of the Tver region

Васильева А. И., Зуева Л. В.

Vasilyeva A. I., Zueva L.V.

*Тверской государственный университет, г. Тверь, Россия. E-mails: aivasileva@edu.tversu.ru; zuevabio2012@yandex.ru
Tver State University, Tver, Russia*

Реферат. На сегодняшний день оценка качественного и количественного содержания ассимилирующих пигментов в талломах лишайников является одним из распространенных показателей для выявления степени повреждения этих организмов в условиях загрязнения среды. Цель работы – оценка содержания фотосинтезирующих пигментов (хлорофилла *a* и *b*) в талломах лишайника *Parmelia sulcata* Taylor в экосистемах г. Твери и Спировского района Тверской области с разной степенью антропогенной трансформации. Проведено исследование содержания пигментов в образцах лишайника *P. sulcata*, собранных в рекреационных зонах г. Твери и пгт Спирово с различным уровнем антропогенной трансформации и загрязнения. Обнаружены значительные различия в содержании хлорофиллов *a* и *b*, что указывает на высокую пластичность фотосинтетической системы. Уровень содержания Хл *a* в рекреационных зонах выше, чем в фоновых условиях. Высокая изменчивость значений концентраций Хл *b* свидетельствует о приоритетном значении пигментной системы при адаптации к изменению характеристик местообитания. Для оценки воздействия городской среды на биологические объекты информативным может быть соотношение содержания хлорофиллов. В ненарушенных природных экосистемах содержание Хл *a* больше, чем Хл *b*, а в антропогенно трансформированных – концентрация Хл *a* меньше, чем Хл *b*.

Ключевые слова. Городская среда, биоиндикация, биомониторинг, пигментная система, рекреационные зоны, фотосинтетические пигменты, хлорофилл *a*, хлорофилл *b*, эпифитные лишайники, *Parmelia sulcata* Taylor.

Summary. To date, the assessment of the qualitative and quantitative content of assimilating pigments in lichen thallomas is one of the most common indicators for identifying the degree of damage to these organisms in conditions of environmental pollution. The aim of the work is to assess the content of photosynthetic pigments (chlorophyll *a* and *b*) in the thallus of *Parmelia sulcata* Taylor lichen in the ecosystems of Tver and the Spirovsky district of the Tver region with varying degrees of anthropogenic transformation. The study of the pigment content in the samples of lichen *P. sulcata* collected in the recreational areas of the city of Tver and the village of Spirovo with different levels of anthropogenic transformation and pollution. Significant differences in the content of chlorophylls *a* and *b* were found, which indicates a high plasticity of the photosynthetic system. The level of Cl *a* content in recreational areas is higher than in background conditions. The high variability of the values of the concentrations of Cl *b* indicates the priority value of the pigment system during adaptation.

Key words. Bioindication, biomonitoring, chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, epiphytic lichens, *Parmelia sulcata* Taylor, photosynthetic pigments, pigment system, recreational areas, urban environment.

Введение. В последнее время интерес к анализу фотосинтетических пигментов в талломах эпифитных лишайников возрастает (Garty et al., 1997; Андрианова, Тарчевский, 2000; Бязров 2002; Veerman et al., 2007; Анищенко и др., 2015; Мейсурова, 2017; Мейсурова и др., 2021). Исследования фотосинтетических пигментов лишайников играют важную роль для понимания характера их «ответа», как важных биоиндикаторов, на изменяющиеся условия макро-, микроклимата и степени загрязнения окружающей среды. На сегодняшний день оценка качественного и количественного содержания ассимилирующих пигментов в талломах лишайников является одним из распространенных показателей для выявления степени повреждения этих организмов в условиях загрязнения среды (Андросова и др. 2008).

Модельными территориями могут быть административный центр Тверской области – г. Тверь и пгт (поселок городского типа) Спирово, в которых присутствуют различные источники загрязнения

и одновременно сохранились крупные фрагменты естественной растительности, включая особо охраняемые природные территории (ООПТ), парки и скверы.

Лишайник *Parmelia sulcata* Taylor довольно чувствителен к антропогенным нагрузкам и климатическим условиям, поэтому можно будет выяснить экологическое состояние г. Твери и пгт Спирово.

Цель работы – оценка содержания фотосинтезирующих пигментов (хлорофилла *a* и *b*) в талломах лишайника *P. sulcata* в экосистемах г. Твери и Спировского р-на Тверской области с разной степенью антропогенной трансформации.

Задачи: 1) сбор образцов и определение уровня содержания Хл *a* и Хл *b*; 2) выяснение характера зависимости значений концентраций от типа местообитания, уровня антропогенной трансформации; 3) оценка значения полученных данных для биоиндикации и перспектив использования в биомониторинге.

Материалы и методы. Объектом исследования были образцы *P. sulcata*. Их сбор был проведен летом, осенью и зимой 2022 г. в г. Твери и Спировском районе Тверской области. Пунктами отбора (ПО) материала г. Твери служили рекреационные зоны (РЗ), которые расположены в трех районах города: памятники природы (ПП) регионального значения, парки, древесные насаждения, вдоль магистралей с интенсивным движением автотранспорта.

В Спировском р-не ПО материала служили РЗ, расположенные в разных местах: древесные насаждения, вдоль магистралей с интенсивным движением автотранспорта (рис. 1, 2; табл. 1).

РЗ различны по площади и степени удаленности от промышленных предприятий, а также по типу растительности. Общее число ПО – 9 шт. В пределах каждого ПО в сумме было собрано по 3 образца, всего обработано 27 проб.

При сборе образцов фиксировали параметры климатических условий (температуру, влажность воздуха и освещенность), а также тип субстрата. Уровень освещенности измеряли с помощью люксметра «МЕГЕОН-21550».

Образцы изучали в лаборатории ЦКП Тверского государственного университета. Содержание пигментов (Хл *a*, Хл *b*) определяли по общепринятой методике на фотоколориметре КФК-3-ЗОМЗ (Россия) при $\lambda = 630, 647, 664$ и 750 нм (ГОСТ 17.1.4.02-90; Мейсунова и др., 2021). Для экстрагирования использовали ацетон (80 %). Концентрацию Хл *a* рассчитали по формулам 1 и 2:

$$c_{xa} = 2,44 \frac{D_{664} - D_{664}^k}{D_{664}} c'_{xa} \quad (1),$$

$$c'_{xa} = (11,85D_{664} - 1,54D_{647} - 0,08D_{630}) \frac{V_3}{V_{pp} \cdot l} \quad (2),$$

где D_{630} , D_{647} , D_{664} и D_{750} – оптические плотности экстракта при $\lambda = 630, 647, 664$ и 750 нм; V_3 – объем экстракта, см³; V_{pp} – объем пробы, дм³; l – длина кюветы, см.

Концентрацию Хл *b* определили по формуле 3:

$$c_b = (21,03D_{647} - 5,43D_{664} - 2,66D_{630}) \frac{V_3}{V_{pp} \cdot l} \quad (3),$$

где D_{630} , D_{647} , D_{664} и D_{750} – оптические плотности экстракта при $\lambda = 630, 647, 664$ и 750 нм; V_3 – объем экстракта, см³; V_{pp} – объем пробы, дм³; l – длина кюветы, см.

Величины оптических плотностей, используемые при расчете в формулах 1–3, выбирали с учетом поправки, равной оптической плотности при $\lambda = 750$ нм. Эта поправка вычитается из значения измеренной оптической плотности.

Величины оптических плотностей, используемые при расчете в формулах 1–3, выбирали с учетом поправки, равной оптической плотности при $\lambda = 750$ нм. Эта поправка вычитается из значения измеренной оптической плотности.

Статистическая обработка данных и определение параметров (средние значения концентрации хлорофиллов, их соотношения у каждого вида и между видами, коэффициенты корреляции) проведены стандартными методами математической обработки с использованием лицензионных программных продуктов Microsoft Office Excel 2019 (Мейсунова, 2017).

Таблица 1

Характеристика пунктов отбора (ПО 1–9) образцов *Parmelia sulcata* в Спировском районе и г. Тверь

№	Название ПО	Координаты	Промышленность
Спировский район			
1	Садовый участок	N57.430274°, E35.026991°	Выхлопы газов от трактора и газона, газонокосилка
2	д. Матвеево	N57.420437°, E35.123196°	Выхлопы газов от техники (мало)
3	д. Бобово	N57.416229°, E35.010493°	Автотранспорт, действующий стекольный завод
4	Железная дорога	N57.416847°, E35.003277°	Железная дорога, действующий стекольный завод
5	ул. Пушкина	N57.425361°, E34.981036°	Автотранспорт, бывший стекольный завод
г. Тверь			
Пролетарский район			
6	Первомайская роща (ПП)	N56.84194° E35.83589°	<i>энергетическая отрасль:</i> Тверская ТЭЦ-1; <i>машиностроение:</i> ОАО «Тверской завод электроаппаратуры – ЭЛТОР», ООО «Тверьстроймаш», ООО «ЖБИ-1»; <i>полиграфическая отрасль:</i> ОАО «Тверской полиграфический комбинат» Автотранспорт
Московский район			
7	Южный парк	N56.82873° E35.90217°	<i>пищевая промышленность:</i> Холдинг «Афанасий»; <i>энергетическая отрасль:</i> ООО «Калининский электромеханический завод» Автотранспорт
8	Бобачевская роща	N56.83022° E35.93502°	
Центральный район			
9	Парк Победы	N56.84554° E35.9144°	<i>лёгкая промышленность:</i> ОАО «Тверская швейная фабрика» Автотранспорт

Примеч.: ПП – памятники природы.

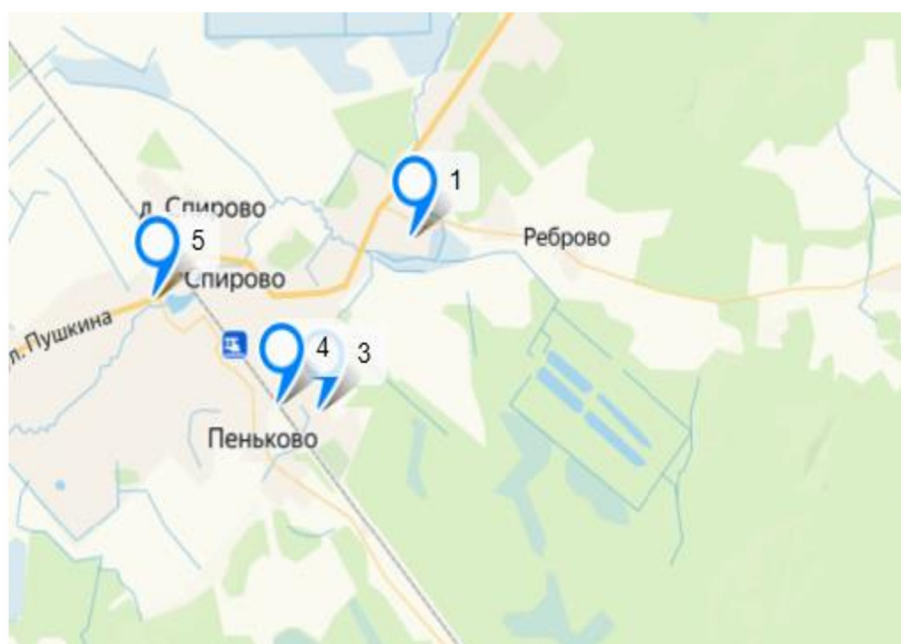
Результаты и обсуждение. В ходе пигментного анализа образцов получены следующие резуль-

Рис. 1. Расположение пунктов отбора (ПО 1–5) образцов лишайника в Спировском районе.

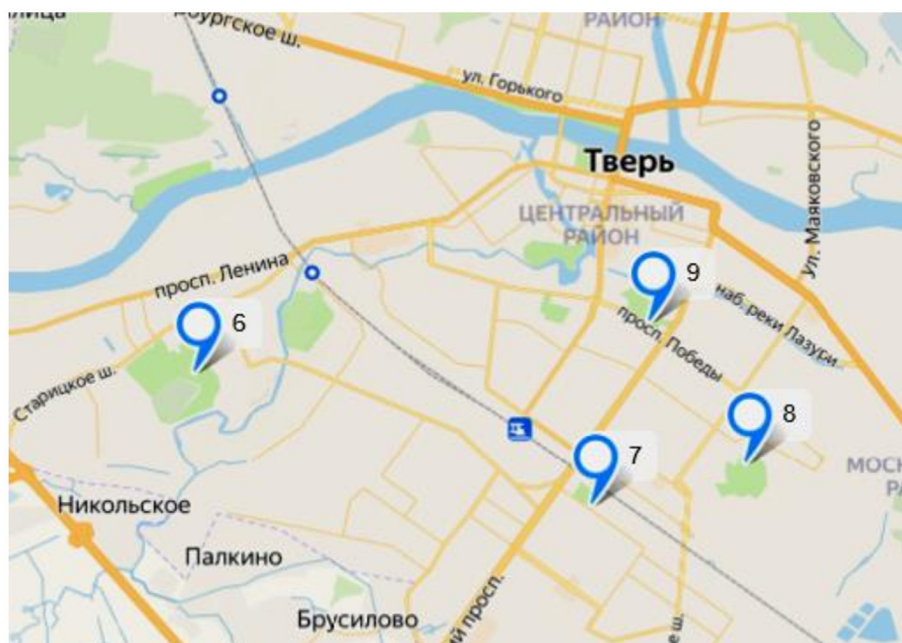


Рис. 2. Расположение пунктов отбора (ПО 6–9) образцов лишайника в г. Твери.

таты (рис. 3; табл. 2). Среднее суммарное содержание Хл *a* и Хл *b* в образцах лишайника *P. sulcata* выше фонового значения и составляет в Спировском районе 2,45, в г. Твери 2,92; среднее соотношение концентраций хлорофиллов в Спировском районе $a/b = 5,15$, в г. Твери $a/b = 3,67$.

Выяснено, что уровень содержания Хл *a* и Хл *b* различны (табл. 1). Среднее содержание Хл *a*

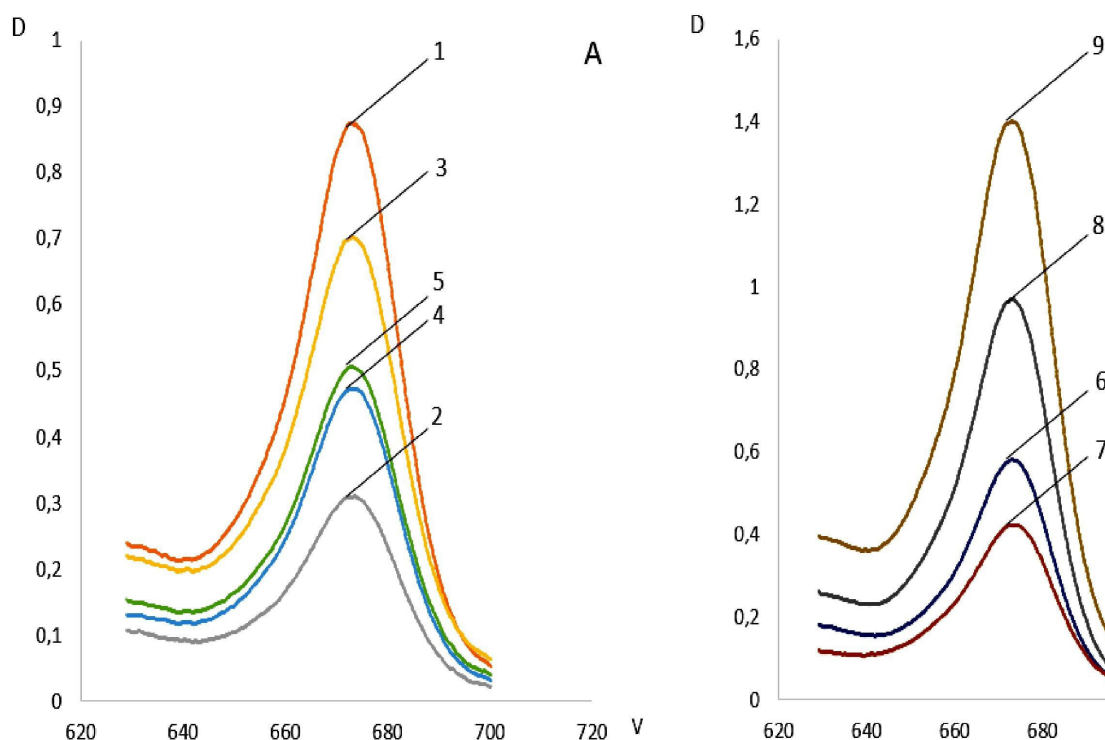


Рис. 3. Спектры поглощения ДМСО-экстарктов пигментов образцов лишайника *Parmelia sulcata* из ПО 1–9: А – Спировский р-н, Б – г. Тверь.

больше, чем Хл *b*: в Спировском р-не Хл *a* (2,04), Хл *b* (0,41); в г. Твери Хл *a* (2,09), Хл *b* (0,84). Значения концентраций Хл *a* и Хл *b* характеризуются меньшей вариабельностью в Спировском районе: Хл *a* (от

0,06 до 0,16), Хл *b* (от 0,01 до 0,03). В г. Твери вариабельность выше: Хл *a* (от 0,06 до 1,41), Хл *b* (от 0,02 до 1,34). Разница между максимальными и минимальными значениями для Хл *a* в Спировском районе составляет (0,1), в г. Твери (1,35). Разница между максимальными и минимальными значениями для Хл *b* в Спировском районе составляет (0,02), в г. Твери (1,32).

Таблица 2

Средние значения физиологических характеристик в образцах *Parmelia sulcata* из разных РЗ пгт Спирово и г. Твери

ПО	Среднее значение		Фоновые значения (Мейсунова и др., 2021)	
	Хл <i>a</i> , мг/г	Хл <i>b</i> , мг/г	Хл <i>a</i> , мг/г	Хл <i>b</i> , мг/г
пгт Спирово			1,36	0,29
1	3,12 ± 0,06	0,64 ± 0,02		
2	1,15 ± 0,08	0,22 ± 0,01		
3	2,4 ± 0,16	0,53 ± 0,03		
4	1,66 ± 0,12	0,3 ± 0,02		
5	1,89 ± 0,1	0,34 ± 0,01		
г. Тверь				
6	2,26 ± 0,09	0,45 ± 0,02		
7	1,24 ± 0,06	0,42 ± 0,03		
8	2,64 ± 0,85	1,31 ± 1,34		
9	2,2 ± 1,41	1,17 ± 0,85		

Показатель среднего содержания хлорофиллов выше значений для этого вида в фоновых условиях для Тверской области (Мейсунова и др., 2021). В Спировском р-не среднее содержание Хл *a* выше фона в 1,51 раза (среднее фоновое значение 1,35), Хл *b* – в 1,4 раза (среднее фоновое значение 0,29); в г. Твери среднее содержание Хл *a* выше фона в 1,55 раза (среднее фоновое значение 1,35), Хл *b* – в 2,9 раза (среднее фоновое значение 0,29). Концентрация хлорофилла *a* зависит от степени антропогенной трансформации экосистем; хлорофилла *b* – в большей степени от микроклиматических условий и характеристик экологических ниш, в которых растет лишайник (Мейсунова, 2017).

Особенности урбосреды (разное освещение, влажность) оказывают существенное влияние на фотосинтетическую систему (Онофрейчук и др., 2017). В литературе неоднократно отмечено, что в естественных природных экосистемах содержание Хл *a* преимущественно выше, чем содержание Хл *b* (Войцехович, Кашеваров, 2010; Андросова и др., 2015).

Незначительное превышение средних значений концентраций содержания Хл *a* по сравнению с фоном может свидетельствовать об отсутствии значимого для лишайника уровня загрязнения среды. Максимальные значения Хл *a* наблюдаются в образцах из ПО 1, 3 и 8; минимальные – в образцах из ПО 2 и 7 (табл. 1). Изменение значений концентраций Хл *a* по градиенту в образцах сопряжено с разным уровнем загрязнения среды. Максимальные значения Хл *b* наблюдаются в образцах из ПО 8 и 9; минимальные – в образцах из ПО 2. Изменение содержания Хл *b* является ответной реакцией, как правило, на недостаток освещения.

В г. Твери вариабельность выше, чем в пгт Спирово, это связано с тем, что городе наблюдается большее воздействие антропогенной нагрузки.

Заключение. При анализе содержания фотосинтетических пигментов *P. sulcata* установлено, что уровни концентраций Хл *a* и Хл *b* обуславливаются разными факторами. Содержания пигментов выше фонового в г. Твери и в пгт Спирово. В г. Твери выше, чем в области. Градиент изменения концентраций Хл *a* отражает разный уровень загрязнения среды. В образцах из РЗ с наибольшей степенью загрязнения выявлены максимальные значения концентраций Хл *a*. При допустимом уровне загрязнения среды приоритетной для данного вида является адаптация к изменению микроклиматических условий местообитания. Наиболее лабильно содержание Хл *b*. Маркером антропогенной трансформации урбоэкосистем может быть соотношение содержания хлорофиллов *a* и *b*.

ЛИТЕРАТУРА

- Андреанова Ю. Е., Тарчевский И. А.** Хлорофилл и продуктивность растений. – М.: Наука, 2000. – 135 с.
- Андросова В. И., Вержбицкая Е. В., Слободяник И. И.** Содержание фотосинтетических пигментов в талломе лишайника *Nurogymnia physodes* L. в разных условиях местообитания // Материалы Всерос. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века» в рамках XII съезда Рус. ботан. о-ва (г. Петрозаводск, 22–27 сентября 2008 г.). – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. – Т. 6. – С. 10–12.
- Андросова В. И., Марковская Е. Ф., Семенова Е. В.** Фотосинтетические пигменты лишайников рода *Cladonia* скальных лесных сообществ горы Оловгора (Архангельская область) // Успехи современного естествознания, 2015. – № 2. – С. 120–125.
- Анищенко Л. Н., Сквородникова Н. А., Борздыко Е. В.** Химическая лишеноиндикация как основа биомониторинга воздуха в антропогенных экосистемах // Фундаментальные исследования, 2015. – № 2. – С. 2144–2148.
- Бязров Л. Г.** Лишайники в экологическом мониторинге. – М.: Научный мир, 2002. – 336 с.
- Войцехович А. А., Кашевиков Г. П.** Пигменты фотосинтетического аппарата зеленых водорослей – фотобионтов лишайников // Альгология, 2002. – Т. 20, № 3. – С. 287–299.
- ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. Контроль качества воды: Сб. ГОСТов. – М.: Стандартинформ, 2010.
- Мейсунова А. Ф.** Техногенное загрязнение почв тяжелыми металлами в г. Твери // Вестник ТвГУ. Серия «Биология и экология», 2017. – № 2. – С. 324–342.
- Мейсунова А. Ф., Нотов А. А.** О проблеме оценки индикаторной способности близкородственных видов лишайников по данным спектрального анализа // Полевой журнал биолога, 2021. – Т. 3, № 1. – С. 64–73.
- Онофрейчук О. Н., Злыднев А. А., Анищенко Л. Н.** Эколого-физиологические особенности видов лишено- и бриобиоты как комплексный показатель биомониторинга // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: матер. XV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Киров: ФГБУН Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 2017. – С. 190–195.
- Garty J., Kloog Y., Cohen R., Wolfson R., Karnieli A.** The effect of air pollution on the integrity of chlorophyll spectral reflectance response, and on concentrations of nickel, vanadium and sulfur in the lichen *Ramalina duriaei* (De Not.) Bagl // Environ. Res., 1997. – Vol. 74. – P. 174–187.
- Veerman J., Vasil'ev S., Gavin D. Paton, Ramanauskas J., Doug B.** Photoprotection in the lichen *Parmelia sulcata*: The origins of desiccation-induced fluorescence quenching // Plant Physiol., 2007. – Vol. 145. – P. 997–1005.