

ВВМ(-N) – 4,42. Минимальный составил 2,79 мкм на 2 неделе в варианте ВВМ (1/2 N). Это позволяет сделать вывод, что оптимальные условия на среде Болда (1/2 N), ВВМ(-N).

Таким образом, можно сделать вывод, что при дефиците азота активно запускается процесс азотфиксации. Вариабельность размеров и их распределение в трихомах коррелируют с адаптацией к изменяющимся условиям азотного обмена, что подтверждает роль цианобактерий рода *Nostoc* как ключевого азотфиксатора в почве.

Литература

1 Алексахина, Т. И. Почвенные водоросли лесных биогеоценозов / Т. И. Алексахина, Э. А. Штина. – М. : Наука, 1984. – 149 с.

2 Штина, Э. А., Экология почвенных водорослей / Э. А. Штина, М. М. Голлербах. – М. : Наука, 1976. – 143 с

3 Голлербах, М. М., Почвенные водоросли / М. М. Голлербах, Э. А. Штина. – Л.: Наука, 1969. – 228 с.

4 Осипова, Е. А., Шарова, Е. Ю., Боровиков, И. М. Особенности метаболизма азота у симбиотических штаммов *Nostoc punctiforme* в ассоциации с *Marchantia polymorpha* // Экологическая генетика. – 2022. – Т. 20, № 1. – С. 15-27.

5 Сидорова, А. С., Дегтярева, М. В., Туманов, И. А. Регуляция образования гетероцист и нитрогеназной активности у *Nostoc* sp. PCC 7120 в условиях колебания доступности азота // Микробиология. – 2023. – Т. 92, № 3. – С. 291–303.

6 Zhou R., Wu Z., Wang X., Rosenqvist E., Wang Y., Zhao T., Ottosen C. O. The combined effect of nitrogen and phosphorus on lipid productivity in *Nostoc muscorum* // Bioresource Technology. – 2022. – Vol. 344, Pt B. – P. 126257.

УДК 577.355:582.29

П. О. Невейков

Науч. рук.: **О. М. Храмченкова**, канд. биол. наук, доцент

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОДЕРЖАНИЕ ПИГМЕНТОВ ФОТОСИНТЕЗА В ТАЛЛОМАХ *EVERNIA PRUNASTRI*

*В ходе исследования установлено, что содержание фотосинтетических пигментов в талломах *Evernia prunastri* тесно связано*

с влажностью и температурой. Содержание хлорофилла *a* и каротиноидов статистически значимо выше в воздушно-сухих талломах ($p < 0,05$), тогда как увлажнение приводит к их снижению. Температура оказывает модулирующее влияние, особенно на содержание хлорофилла *b* ($p < 0,05$), а также на соотношения пигментов. Выявлено статистически значимое взаимодействие влажности и температуры для хлорофилла *b* ($p = 0,0001756$). Полученные данные демонстрируют адаптацию *Evernia prunastri* к дегидратации и подчеркивают важность учета взаимодействия абиотических факторов для понимания адаптационных стратегий лишайников.

Лишайники, как симбиотические ассоциации грибов и фотобионтов, являются важными компонентами наземных экосистем и индикаторами состояния окружающей среды. Их жизнедеятельность, в частности процесс фотосинтеза, напрямую зависит от абиотических факторов, среди которых ключевую роль играют влажность и температура [1, 2]. Фотосинтетические пигменты – хлорофиллы и каротиноиды – не только обеспечивают преобразование световой энергии, но и участвуют в защите фотосинтетического аппарата от стрессовых воздействий [3, 4]. Несмотря на значительное количество работ, посвященных физиологии лишайников, комплексное влияние влажности и температуры на пул фотосинтетических пигментов изучено недостаточно.

Целью настоящего исследования явилась оценка зависимости содержания пигментов фотосинтеза в талломах лишайника *Evernia prunastri* от влажности таллома и температуры окружающей среды.

Объектом исследования служил эпифитный лишайник *Evernia prunastri* (L.) Ach., собранный в пригородных лесах г. Гомеля. Слоевница отделяли от субстрата и высушивали до постоянной массы при комнатной температуре.

Для экспериментов использовали воздушно-сухие и увлажненные (в течение 24 часов) талломы. Опыты проводили в двух сериях. В первой серии навески воздушно-сухих талломов выдерживали в чашках Петри по 5–7 часов при трех температурных режимах: комнатная температура (26 °C), +12 °C (холодильник) и +45 °C (сушильный шкаф). Во второй серии увлажненные талломы выдерживали в тех же условиях на слое влажной фильтровальной бумаги.

Пигменты экстрагировали 85 %-ным ацетоном. Оптическую плотность экстрактов измеряли на спектрофотометре Solar PB2201 при длинах волн 440,5; 644 и 662 нм. Концентрацию хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов рассчитывали по формулам [5]:

$$C_{\text{хла}} = 10,3 \cdot D_{663} - 0,918 \cdot D_{644},$$

$$C_{\text{хлб}} = 19,7 \cdot D_{644} - 3,87 \cdot D_{663},$$

$$C_{\text{хла+хлб}} = 6,4 \cdot D_{663} + 18,8 \cdot D_{644},$$

$$C_{\text{кар}} = 4,75 \cdot D_{452,5} - 0,226 \cdot C_{\text{хла+хлб}},$$

где C – концентрация хлорофиллов a , b и каротиноидов в мг/л;
 D – оптическая плотность в центрах поглощения пигментов 452,5; 644 и 663 нм.

Статистическую обработку данных проводили с использованием двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) и пост-хок теста Тьюки.

Исследование показало, что влажность является доминирующим фактором, определяющим содержание хлорофилла a и каротиноидов в талломах *E. prunastri*. Как в воздушно-сухих, так и в увлажненных образцах была выявлена четкая зависимость концентрации этих пигментов от влажностного режима – таблица 1.

Таблица 1 – Содержание пигментов фотосинтеза (мг/г) в талломах *E. prunastri* в зависимости от влажности и температуры

Условия	Хлорофилл a	Хлорофилл b	Каротиноиды
Воздушно-сухие			
12 °С	0.31±0.09	0.56±0.18	0.22±0.04
26 °С	0.34±0.11	0.11±0.03	0.18±0.04
45 °С	0.43±0.05	0.14±0.01	0.24±0.02
Увлажненные			
12 °С	0.042±0.01	0.019±0.008	0.016±0.006
26 °С	0.034±0.004	0.015±0.006	0.018±0.002
45 °С	0.034±0.023	0.009±0.004	0.020±0.008

Двухфакторный дисперсионный анализ подтвердил статистически значимое влияние влажности на содержание хлорофилла a ($p = 8,152E-13$) и каротиноидов ($p = 2,842E-11$). Влияние температуры и взаимодействия факторов для этих пигментов оказалось незначимым ($p > 0,05$).

Полученные результаты можно объяснить физическими и физиологическими процессами в талломе. При высыхании лишайник теряет воду, что приводит к уменьшению его массы и объема, а количество

пигментов при кратковременной дегидратации остается прежним. В результате наблюдалось их относительное концентрирование в расчете на грамм сырой массы. И наоборот, при насыщении таллома водой его масса значительно увеличивается, и то же самое количество пигментов «разбавляется» в большем объеме биомассы, что и регистрируется как снижение их концентрации. Это явление описано в ряде исследований физиологии лишайников [2, 4].

Напротив, содержание хлорофилла *b* находилось под комплексным влиянием как влажности ($p = 2,606E-06$), так и температуры ($p = 0,0001247$). Наиболее существенным результатом явилось выявление статистически значимого взаимодействия этих двух факторов ($p = 0,0001756$). Это указывает на то, что влияние влажности на хлорофилл *b* зависит от температурного режима, и наоборот. В воздушно-сухих образцах при 12 °C наблюдалась аномально высокая концентрация хлорофилла *b* ($0,56 \pm 0,18$ мг/г), которая статистически значимо отличалась от его содержания при 26 °C и 45 °C. Высокая вариабельность показателя может свидетельствовать о нестабильности этого пигмента в условиях низких температур и дегидратации.

Температура оказала значимое влияние на соотношения пигментов. Соотношение хлорофилл *a/b* значимо различалось между образцами, выдержанными при 12 °C и 45 °C ($p = 0,005683$). Низкое значение этого соотношения при 12 °C в воздушно-сухих образцах ($0,55 \pm 0,005$) указывает на преобладание хлорофилла *b*, что может быть связано с адаптацией фотосинтетического аппарата к холодному стрессу.

Соотношение суммы хлорофиллов к каротиноидам также зависело от температуры, показывая значимые различия между 12 °C и 26 °C ($p = 0,04423$), а также между 12 °C и 45 °C ($p = 0,02807$). Более высокое значение этого соотношения при 12 °C ($3,95 \pm 1,36$ в воздушно-сухих образцах) свидетельствует об относительном увеличении доли хлорофиллов, что, возможно, направлено на компенсацию снижения фотосинтетической активности при низких температурах.

Повышенное содержание пигментов в воздушно-сухих талломах отражает не активный синтез, а состояние покоя, при котором торможение метаболизма и потеря воды приводят к их пассивному концентрированию. Таким образом, это состояние консервирует, но не активизирует фотосинтетический аппарат.

Содержание хлорофилла *b* находится под комплексным контролем влажности, температуры и их взаимодействия, что указывает на его особую роль в адаптации к сочетанному действию абиотических стрессоров.

Температура оказывает модулирующее влияние на соотношения фотосинтетических пигментов. Выявленные сдвиги в соотношениях пигментов под влиянием температуры являются адаптивным ответом:

Снижение соотношения хлорофилл *a/b* при +12 °С может говорить о попытке увеличить эффективность улавливания света (так как хлорофилл *b* поглощает свет в синей области спектра) в неоптимальных для фотосинтеза холодных условиях.

Оптимальные для физиологической активности условия, судя по сбалансированным соотношениям пигментов, наблюдались при комнатной температуре (+26 °С). Именно в этих условиях, вероятно, достигается баланс между эффективностью фотосинтеза и защитными функциями.

Высокая температура (+45 °С), наряду с обезвоживанием, вызвала увеличение доли каротиноидов относительно суммы хлорофиллов (снижение соотношения хл/кар).

Полученные данные имеют практическое значение для лишеноиндикации: они подчеркивают, что для корректной оценки состояния лишайников-биоиндикаторов необходимо учитывать не только видовую принадлежность, но и влажностно-температурный режим в момент отбора проб, так как он напрямую влияет на измеряемые физиологические параметры.

Литература

1 Nash III Т.Н. Lichen biology / Т.Н. Nash III [et al.]. – Cambridge University Press, 1996, 2008. – 486 p.

2 Kranner I. Protocols in Lichenology Culturing, Biochemistry, Ecophysiology and Use in Biomonitoring / I. Kranner [et al.]. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – 580 p.

3 Войцехович А.А. Фотобионты лишайников: разнообразие, экология и взаимоотношения с микобионтом. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 102 с.

4 Тарасова, В. Н. Лишайники: физиология, экология, лишеноиндикация: учебное пособие / В. Н. Тарасова, А. В. Сониная, В. И. Андросова. – Петрозаводск: Изд – во ПетрГУ, 2012. – 368 с.

5 Кахнович, Л. В. Фотосинтез: Методические рекомендации к лабораторным занятиям, задания для самостоятельной работы и контроля знаний студентов / Л. В. Кахнович. – Мн.: БГУ, 2003. – 88 с.