

анаэробноз и депривации N, S и Cu. В результате проведенных исследований было показано снижение удельной скорости роста культур клеток, продуцирующих биоводород на средах депривированных по N, S и Cu по отношению к контрольной среде. Пики накопления биоводорода были зафиксированы на 6 сут анаэробного культивирования для среды без N ($7,43 \pm 1,49$ ммоль г сухой массы⁻¹), на 2 сутки для среды без S и Cu ($10,46 \pm 2,84$ ммоль г сухой массы⁻¹). Концентрация общего белка в данных культурах росла на контрольной среде до 257,5% от изначального значения, на средах без N, без S и Cu наблюдался рост до 25,7% и 95,4%, соответственно, относительно изначального показателя. Высокий выход H₂ и белка, обнаруженный при депривации N, S и Cu, указывает на потенциальную возможность использования данных условий для производства биоводорода и одновременно белка. Кроме того, обнаруженный стимулирующий эффект депривации по S и Cu указывает на вовлечённость Cu-содержащих ферментов в поддержание редокс-баланса при синтезе H₂. Так как основным пулом белков, содержащих медь, являются пластоцианин, комплекс IV митохондриальной ЭТЦ и медные оксидазы, то представляется актуальным дальнейшее исследование роли данных систем в синтезе H₂.

Тепловой стресс у лишайников рода Пельтигера: роль фотосинтетических пигментов

**Галеева Е. И.^{A*}, Хайруллина А. Ф.^A, Рахматуллина Д. Ф.^A,
Хабибрахманова В. Р.^A, Гурьянов О.П.^A, Валитова Ю. Н.^A,
Минибаева Ф. В.^A**

^A Казанский институт биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия.

*E-mail: kgu@mail.ru

Лишайники представляют собой сложные симбиотические ассоциации, между грибами (микобионтами) и водорослями и/или цианобактериями (фотобионтами). Известно, что ареал обитания лишайников чрезвычайно широк, и они могут расти в экстремальных условиях, непригодных для существования других фотосинтезирующих организмов. Интересной группой лишайников являются лишайники порядка Пельтигеровые, широко распространенные по всему миру и произрастающие в умеренном климате. Пельтигеровые отличаются высокими темпами роста и активным редокс-метаболизмом [1]. Данные лишайники интересны для изучения фотосинтеза и пигментного состава, так как имеют относительно высокое содержание фотобионта и, следовательно, богаты пигментами и обладают высокой фотосинтетической активностью [2].

Известно, что у растений большой вклад в защиту фотосинтетического аппарата вносят каротиноиды: они проявляют антиоксидантную активность, защищают от УФ-лучей, действуя как экранирующие пигменты, и повышают устойчивость фотосинтетических мембран, связываясь с белками и липидами [3]. Представляет интерес изучение роли данных пигментов в стрессовой устойчивости лишайников.

Целью данного исследования было выявление вклада фотосинтетических пигментов в формирование стратегии стрессового ответа исследуемых лишайников на действие повышенной температуры с учетом особенностей их симбионтов. *P. aphthosa* в отличие от *P. canina* является трехкомпонентным лишайником, в его состав помимо цианобактерии *Nostoc* входит зеленая водоросль *Coccomyxa*. Для создания стресса талломы лишайника инкубировались в климатической камере при температуре + 40 °С в течение 3 ч с поддержанием постоянной влажности. Контролем служили гидратированные талломы лишайников, не подвергнутые стрессовой обработке. Для более глубокого понимания процессов, происходящих в фотосинтетическом аппарате лишайников в условиях высокотемпературного стресса, нами были проанализированы пигментный состав лишайников и их фотосинтетическая активность.

Температурный стресс является достаточно обычным явлением для лишайников, произрастающих зачастую в неблагоприятных условиях. Известно, что важной составляющей стрессового ответа живого организма на воздействие абиотических стрессовых факторов является увеличение образования активных форм кислорода (АФК) [4] и развитие окислительного стресса. Ранее нами было показано, что в лишайниках при действии повышенной температуры возрастает уровень перекисного окисления липидов, содержание перекиси водорода, что свидетельствует об изменении редокс-статуса клеток [5]. Система антиоксидантной защиты клеток, наряду с ферментами, включает в себя и низкомолекулярные антиоксиданты, такие как каротиноиды. Каротиноиды являются активными поглотителями синглетного кислорода в растениях и участвуют в механизмах фотозащиты и стабилизации фотосинтетического аппарата [6].

Установлено, что воздействие повышенной температуры значительно повлияло на флуоресценцию хлорофилла α лишайников рода *Peltigera*. Сравнение фотосинтетической активности контрольных образцов исследуемых лишайников показало, что у *P. aphthosa* некоторые показатели фотосинтеза значительно выше, чем у *P. canina*, что может свидетельствовать о более развитой фотосинтетической системе у *P. aphthosa*. При воздействии повышенной температуры наблюдается снижение максимальной фотохимической эффективности ФС II (F_v/F_m) у обоих видов лишайников, причем у *P. canina* этот показатель уменьшился

в большей степени – в 3,4 раза. Скорость потока электронов через фотосистемы и индекс жизнеспособности также в большей степени снижались у *P. canina* по сравнению с *P. aphthosa*.

ВЭЖХ-анализ показал, что преобладающим каротиноидом в лишайнике *P. aphthosa* является лютеин, также показано наличие β -каротина, α -каротина, виолосантина, неоксантина, зеаксантина, и нескольких неидентифицированных каротиноидов. На присутствие в лишайнике зеленой водоросли *Scolecococcus* указывает наличие в составе пигментов хлорофилла *b*. При действии повышенной температуры на гидратированные талломы лишайника *P. aphthosa* происходило уменьшение содержания всех обнаруженных пигментов, как хлорофиллов, так и каротиноидов.

Было обнаружено, что преобладающим каротиноидом лишайника *P. canina* является β -каротин, кроме того, показано наличие неоксантина, виолосантина, антераксантина, кантаксантина, зеаксантина, лютеина и нескольких неидентифицированных каротиноидов. В отличие от *P. aphthosa*, в лишайнике *P. canina* температурное воздействие приводило к значительному увеличению общего пула пигментов, как каротиноидов, так и хлорофиллов. Увеличение общего пула каротиноидов может быть направлено на защиту фотосинтетического аппарата лишайника от разрушительного действия АФК.

Таким образом, на основании полученных данных можно заключить, что несмотря на близкое родство исследуемых лишайников, в условиях высокотемпературного стресса, они демонстрируют две различные пигмент-опосредованные стратегии стрессового ответа. Изменения каротиноидного спектра может быть частью антиоксидантного ответа клеток лишайников на действие повышенной температуры. Судя по физиологическим показателям, *P. aphthosa* более успешно справляется со стрессовым воздействием, возможно, обусловлено усилением фотосинтетического аппарата лишайника дополнительным фотобионтом – зеленой водорослью *Scolecococcus*. Показано, что различия в пигментном составе лишайников *P. canina* и *P. aphthosa* обуславливают специфичность их стрессового ответа на действие повышенной температуры.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН и при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-14-00362.

Библиографические ссылки

1. Beckett R.P., Minibayeva F.V., Vylegzhanina N.N. Tolpysheva T. High rates of extracellular superoxide production by lichens in the suborder *Peltigerineae* correlate with indices of high metabolic activity // Plant, Cell and Environment. 2003.- Vol. 26.- P. 1827–1837.

2. Котлова, Е. Р. Антиокислительные системы лишайников: дисс. канд. биол. наук: 03.00.1203.00.24 / Котлова Екатерина Робертовна; Ботанический институт им. В. Л. Комарова. – Санкт-Петербург, 2000. – 199 с.
3. Ладыгин В. Г. Пути биосинтеза, локализация, метаболизм и функции каротиноидов в хлоропластах различных видов водорослей. / В. Г. Ладыгин // Вопросы современной альгологии. – Пущино, 2014. – 87 с.
4. Bolwell G.P., Bindschedler L.V., Blee K.A., Butt V.S., Davies D.R., Gardner S.L., et al. The apoplastic oxidative burst in response to biotic stress in plants: a three-component system // *Journal of Experimental Botany*. 2002.- Vol. 53.- P. 1367–1376.
5. Валитова Ю.Н., Хабибрахманова В.Р., Гурьянов О.П., Уваева В.Л., Хайруллина А.Ф., Рахматуллина Д.Ф., Галеева Е.И., Трифонова Т.В., Викторова Л.В., Минибаева Ф.В. // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2023.- Т.13.- № 4.- С.532-542.
6. Hashimoto H., Uragami C., Cogdell R.J. “Carotenoids and photosynthesis,” in *Carotenoids in Nature*. Springer: Cham, Switzerland, 2016. P. 111

Механизмы регуляции разных сценариев ксилогенеза на примере карельской березы: взаимодействие ауксинового и АФК-сигналинга

**Галибина Н. А.^{А*}, Мощенская Ю. Л.^А, Тарелкина Т.В.^А,
Никерова К. М.^А, Горшкова Т. А.^Б, Горшков О. В.^Б,
Корженевский М. А.^А, Серкова А. А.^А, Чирва О. В.^А**

^А *Институт леса – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», Петрозаводск, Россия.*

*E-mail: 181102@mail.ru

^Б *Казанский институт биохимии и биофизики – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия.*

В последнее время во всем мире растет интерес к изучению молекулярных механизмов, регулирующих формирование тканей ствола древесных растений. Поиск путей эффективного управления ксилогенезом актуален как с точки зрения повышения продуктивности растений, так и получения древесины с заданными свойствами. Все многообразие структурных элементов флоэмы и ксилемы образуется из стволовых клеток латеральной меристемы – камбия. Несмотря на впечатляющие достижения в клеточной, молекулярной и структурной биологии, наше понимание взаимодействия сигнальных путей при разных сценариях ксило- и флоэмогенеза даже для модельных растений *Arabidopsis* и *Populus* все еще фрагментарно.

Объектами нашего исследования являются две формы березы повислой: обычная береза повислая (*Betula pendula* Roth var *pendula*) с типичной