

ERF и MYB. Четвёртую группу составляли белки, уровень которых снижался при аноксии и снова возрастал при реаэрации, в частности, пероксиредоксин и арабиназа. Весьма любопытно, что не было выявлено белков, специфичных только для постаноксии. Более того, так же, как и в случае метаболомов, протеом после 24 ч аноксии кластеризовался по результатам анализа методом главных компонент вместе с постаноксическим (24 ч), но не с нормоксическим протеомом. Результаты метаболомного и протеомного анализа позволяют заключить, что постаноксия не является самостоятельным стрессором, и её следует считать продолжением воздействия (последствием) аноксии. Растения, устойчивые к дефициту кислорода, обладают устойчивостью и к постаноксическому окислительному воздействию.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 18-04-00157) и РНФ (проект № 22-24-00484). Участие в симпозиуме поддержано Санкт-Петербургским государственным университетом (грант на исходящую академическую мобильность СПбГУ CONF2024_2 ID: 120787805).

Библиографические ссылки

1. Chirkova T., Yemelyanov V. The study of plant adaptation to oxygen deficiency in Saint Petersburg University. *Biol. Commun.* 2018. 63(1):17–31. doi: 10.21638/spbu03.2018.104
2. Yemelyanov V.V., Puzanskiy R.K., Shishova M.F. Plant life with and without oxygen: A metabolomics approach. *Int. J. Mol. Sci.* 2023. 24(22):16222. doi: 10.3390/ijms242216222
3. Shikov A.E., Chirkova T.V., Yemelyanov V.V. Post-anoxia in plants: reasons, consequences, and possible mechanisms. *Russ. J. Plant Physiol.* 2020. 67(1):45–59. doi: 10.1134/S1021443720010203

Дифференциальная экспрессия генов стрессового ответа в лишайнике *Xanthoria parietina* при дегидратации и регидратации

Ефремова Д. А.^{А,Б}, Лексин И. Ю.^А, Минибаева Ф. В.^{А*}

^А Казанский институт биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия;

^Б Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия;

*E-mail: fminibayeva@gmail.com

Лишайник – симбиотическая ассоциация, основными компонентами которой являются фотобионт и микобионт. Лишайники относят к экстремофилам благодаря их способности выживать в условиях, крайне неблагоприятных для большинства других организмов. В частности, они обладают высокой устойчивостью к обезвоживанию. Механизмы устойчиво-

сти лишайников, направленные на обезвреживание активных форм кислорода и предотвращение быстрой потери воды, регулируются на уровне экспрессии генов. В настоящей работе был проведен анализ экспрессии генов стрессового ответа при обезвоживании лишайника *Xanthoria parietina*. Продукты этих генов участвуют в антиоксидантной защите, обладают осмочувствительностью или входят в процесс синтеза пигмента париетина.

Обезвоживание гидратированного лишайника проводилось в эксикаторе над перенасыщенным раствором CaCl_2 . В ходе эксперимента был произведен расчет относительного содержания воды (ОСВ) по изменениям массы талломов. Для выделения РНК и последующего синтеза кДНК были отобраны следующие образцы талломов: гидратированный контроль, талломы после обезвоживания в течение 5 ч и 17 ч и регидратации в течение 1 ч. Анализ уровня экспрессии генов был проведен методом ПЦР реального времени.

В ходе эксперимента уровень ОСВ в талломах *X. parietina* снизился до 46% через 5 ч обезвоживания и до 7% через 17 ч обезвоживания, а после регидратации этот показатель восстановился до 91%. По результатам количественной ПЦР было отмечено значительное повышение экспрессии гена белка гидрофобина, который способен образовывать на поверхности микобионта и фотобионта водонепроницаемый слой. Вместе с этим увеличилась экспрессия генов ферментов, участвующих в антиоксидантной защите: каталазы, глутаредоксина, супероксиддисмутазы и метионин-сульфоксидредуктазы. Среди генов, соответствующих осмочувствительным белкам, было отмечено повышение уровня экспрессии гена осмосенсорной протеинкиназы *srk1*. Повышение уровня экспрессии генов, кодирующих ферменты начальных этапов биосинтеза париетина, может свидетельствовать о том, что при обезвоживании происходит активация синтеза предшественников этого пигмента, относящихся к группе антрахинонов. Как известно, антрахиноны обладают антиоксидантной активностью.

При помощи методов биоинформатического анализа была предсказана аннотация исследуемых генов и клеточная локализация соответствующих белков. С использованием программы antiSMASH (Blin *et al.*, 2021) нами было предсказано наличие в лишайнике *X. parietina* генного кластера биосинтеза париетина. Интересно, что в состав этого генного кластера входит белок-транспортер, обнаруженный в недавней работе Llewellyn *et al.* (2023) и не свойственный большинству генных кластеров биосинтеза производных эмодина, в число которых входит и париетин.

Наши результаты позволяют предположить, что обезвоживание лишайника *X. parietina* активирует механизмы регуляции генов, кодирую-

щих белки, такие как гидрофобин, осморегуляторные белки, ферменты антиоксидантной защиты и биосинтеза фенольных соединений, обладающих антиоксидантной активностью. Таким образом, в ответ на обезвоживание в лишайнике *X. parietina* активируется широкий спектр генов, вовлеченных в защитные механизмы.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-14-00327 и в рамках выполнения госзадания КИББ ФИЦ КазНЦ РАН.

Библиографические ссылки

1. Blin, K. antiSMASH 6.0: improving cluster detection and comparison capabilities [Text] / K. Blin, S. Shaw, A. M. Kloosterman, Z. Charlop-Powers, V. G. P. Wezel, M. H. Medema, T. Weber // *Nucleic Acids Research*. – 2021. – V.49. – P. 29-35.

2. Llewellyn, T. Metagenomics shines light on the evolution of “sunscreen” pigment metabolism in the *Teloschistales* (lichen-forming Ascomycota) [Text] / T. Llewellyn, R.W. Nowell, A. Aptroot, M. Temina, T.A. Prescott, T.G. Barraclough, E. Gaya // *Genome Biology and Evolution*. – 2023. – V. 15. – P. evad002.

Антиоксиданты повышают устойчивость растений к стрессовым воздействиям

**Жигачева И.В.^{А*}, Крикунова Н.И.^А, Миль Е.М.^А, Генерозова И.П.^Б,
Буцанец П.А.^Б**

^А Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, 119334, Москва, ул. Косыгина, 4, Факс: +7 (499) 137- 41-07. *E-mail: zhigacheva@mail.ru

^Б Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук, 127276, Москва, ул. Ботаническая, 35.

Митохондрии являются основным источником активных форм кислорода (АФК) в клетках. В физиологических условиях приблизительно 1-3% потребляемого митохондриями кислорода в результате его неполного восстановления образует АФК, которые выполняют функцию сигнальных молекул, регулирующих рост и развитие растений [1]. В норме стационарный уровень АФК в органах и тканях довольно низок (около 10^{-10} М) за счет наличия в них ферментативной и неферментативной систем, контролирующих продукцию и утилизацию этих интермедиатов. Избыток свободных радикалов связан со стрессовыми воздействиями, вызывающими смещение антиоксидантно-прооксидантного равновесия в сторону увеличения генерации АФК, которые в зависимости от силы стрессового воздействия могут служить индукторами процессов адаптации, либо вы-