

## ОБЗОРЫ

*Авторы посвящают этот обзор 100-летию со дня рождения Ольги Александровны Семихатовой, выдающегося исследователя дыхания и энергетического баланса растительных клеток.*

УДК 581.1.

**АВТОФАГИЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СТАТУС РАСТИТЕЛЬНОЙ КЛЕТКИ**

□ 2022 г. Е. В. Тютерева <sup>а, \*</sup>, А. В. Муртузова <sup>а</sup>, О. В. Войцеховская <sup>а</sup>

<sup>а</sup>*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ботанический институт им. В. Л. Комарова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия*

*\*e-mail: ETutereva@binran.ru*

Поступила в редакцию 19.05.2021 г.

После доработки 28.06.2021 г.

Принята к публикации 01.07.2021 г.

Энергетический гомеостаз растительной клетки определяется балансом образования и расходования аденилатов с макроэргическими связями – АТФ и АДФ. Для поддержания анаболизма необходимо относительное насыщение аденилатного пула фосфоангидридными связями. Продукция АТФ в растительной клетке осуществляется в митохондриях и хлоропластах, а оптимальная концентрация АТФ в клеточных компартментах поддерживается с помощью аденилаткиназ, которые функционируют в цитозоле, митохондриях, пластидах и ядре. Для синтеза АТФ в хлоропластах и митохондриях, а также транспорта нутриентов в клетку и органеллы, критически важна регуляция ионного гомеостаза. В энергетическом метаболизме важную роль выполняет автофагия – процесс активной деградации ненужных или поврежденных клеточных компонентов и макромолекул в литической вакуоли. При поддержании высокого энергетического статуса клетки в благоприятных условиях конститутивная автофагия выполняет функцию контроля качества клеточных компонентов. При нехватке энергии автофагия становится механизмом удаления

поврежденных структур, а также ремобилизации метаболитов, используемых для синтеза новых структур и АТФ, что в конечном итоге способствует выживанию клетки. Митофагия и хлорофагия позволяют поддерживать популяцию функционально активных “станций” эффективной продукции АТФ, предупреждая накопление дефектных митохондрий и хлоропластов - потенциальных источников АФК. Однако, усиление автофагического потока выше порогового уровня может предшествовать программированной клеточной смерти (ПКС) вакуолярного типа. В этом случае автофагия тоже выполняет функцию сохранения энергии, обеспечивая отток нутриентов из погибающих клеток в соседние ткани. У растений на сегодняшний день известны два центральных протеин-киназных комплекса, регулирующих переключение между анаболическими и катаболическими путями метаболизма – комплексы киназ SnRK1 (Snf1-related protein kinase 1) и TOR (target of rapamycin). TOR-киназа поддерживает активное протекание энергетически затратных процессов метаболизма в благоприятных условиях, одновременно ингибируя катаболизм, в т.ч. автофагию. В условиях дефицита энергии происходит активация функционального антагониста TOR – киназы SnRK1, которая является сенсором изменений энергетического гомеостаза в растительной клетке. SnRK1 ингибирует TOR, способствуя активации автофагии через несколько независимых путей. В обзоре проанализированы современные представления о взаимодействиях между киназными комплексами SnRK1 и TOR, автофагией и ПКС при регуляции энергетического баланса в клетке растений.

**Ключевые слова:** автофагия, SnRK1-киназа, TOR-киназа, энергетический статус, ионный гомеостаз, АМФ, стресс, программированная клеточная смерть.

## ОБЗОРЫ

*УДК 581.1.577.2:602.6***ТРАНСПЛАСТОМНЫЕ РАСТЕНИЯ: ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**© 2022 г. С. М. Розов<sup>а,\*</sup>, Ю. В. Сидорчук<sup>а</sup>, Е. В. Дейнеко<sup>а</sup>*<sup>а</sup> Федеральный исследовательский центр “Институт цитологии и генетики” Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия**\*e-mail: rozov@bionet.nsc.ru*

Поступила в редакцию 31.07.2021 г.

После доработки 02.09.2021 г.

Принята к публикации 02.09.2021 г.

Основной проблемой производства трансгенных белков в растительных системах экспрессии остается низкий уровень их накопления. Транспластомные растения со встройкой трансгена не в ядерный геном, а в геном пластид – пластом – позволяют в ряде случаев увеличить выход целевого белка в десятки и более раз. Но здесь возникают две основные проблемы: низкая частота интеграции трансгенов в геном пластид и сложности получения гомопластомных и гомопластидных растений. В последние годы наметился ряд тенденций для преодоления этих трудностей. Первая проблема решается совершенствованием систем доставки экзогенной ДНК и тонким дизайном векторов, вторая – многоступенчатым отбором на нескольких антибиотиках и использованием для трансформации дедифференцированных тканей. Подробному рассмотрению этих проблем и их решениям и посвящен настоящий обзор.

**Ключевые слова:** гомопластидность, гомопластомность, транспластомные растения, экспрессия трансгенов, эффективность трансформации пластид.

**RESEARCH PAPERS****Genome-Wide Identification and Characterization of the E2F/DP****Transcription Factor Family in *Triticum aestivum* L.****Y. Yu<sup>a</sup>, X. L. Wang<sup>b</sup>, Y. R. Zhang<sup>a</sup>, T. Q. Song<sup>a</sup>, S. X. Zhang<sup>a</sup>, X. K. Zhang<sup>a,\*</sup>****and D.S. Chen<sup>c,\*\*</sup>**<sup>a</sup>*College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, China*<sup>b</sup>*College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi, China*<sup>c</sup>*The Crop Research Institute, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan, Ningxia, China*<sup>\*</sup>*e-mail: zhangxiaoke66@126.com;*<sup>\*\*</sup>*e-mail: cdsnky@163.com*

**Abstract** – E2F/dimerization partner (DP) transcription factors play essential roles in plant growth and development by regulating the cell cycle. To systematically identify and characterize the E2F/DP transcription factor family in common wheat (*Triticum aestivum* L.), 27 wheat *E2F/DP* genes obtained from public database were classified into three subfamilies (Sub. I, Sub. II, and Sub. III) for in-depth analysis. The results showed that wheat *E2F/DP* genes in each subfamily exhibited similar gene and protein structure. The expression of *E2F/DP* genes was tissue-specific and responsive to various abiotic stresses. Subcellular localization revealed that TaDP2III-3, TaE2F3I-5, TaDP3III-15, and TaE2F1I-19 proteins were mainly located in both nucleus and cytoplasm, whereas TaDEL2II-27 was mainly found in nucleus. Transcription activity experiments showed TaE2F3I-5 and TaE2F1I-19 activated transcription, whereas TaDP2III-3, TaDP3III-15, and TaDEL2II-27 did not. The findings expand our knowledge of wheat E2F/DP transcription factor family and provide valuable information for improving the defense ability of wheat.

*Keywords: Triticum aestivum, E2F/DP, abiotic stress, subcellular localization, self-activation.*

## RESEARCH PAPERS

### In What Way Do Gibberellins Increase Apical Dominance and Correlative Inhibition?

A. A. Kotov<sup>a,\*</sup> and L. M. Kotova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Timiryazev Institute of Plant Physiology, Russian Academy of Sciences, Botanicheskaya ul. 35,  
Moscow, 127276 Russia*

*\*e-mail: kotov\_andrei-62@mail.ru*

Received August 07, 2021; revised August 10, 2021; accepted August 10, 2021

**Abstract** – The interactions of branches in relation to the transports of IAA export activity (*IEA*) were studied in pea plants of the semidwarf cv. *Adagumsky* having a strong apical dominance (*AD*) and the dwarf cv. *Porta* with a weakened *AD*. In a model system of two-branched seedlings, the branches of cv. *Adagumsky* competitively suppressed the growth and *IEA* of each other, but that is not the case with cv. *Porta*. The root supply with GA<sub>3</sub> inhibits the outgrowth of axillary buds at basal node 2 in cv. *Porta* seedlings, thus enhancing *AD*, and led to establishing a 1.5 fold different *IEA* in the shoots between two-branched and one-branched seedlings, making it similar to cv. *Adagumsky*. Thus, the emerging role of GAs as a systemic signal in regulation of *AD* and correlative inhibition is suggested. Molecular mechanisms of GA involvement in these processes are discussed.

*Keywords: Pisum sativum, apical dominance, correlative inhibition, cytokinins, indole-3-acetic acid export activity, gibberellins, strigolactones.*

## RESEARCH PAPERS

### ***VvTOR* Responds to ABA Signal and Affects Sugar Related Genes Expression in Grape**

**Y. Zhao<sup>a</sup> and X.-Q. Wang<sup>a, \*</sup>**

<sup>a</sup> *College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing, 100083, PR China*

*\*e-mail: wangxqbj@163.com*

Received July 22, 2021; revised August 05, 2021; accepted August 05, 2021

**Abstract** — The target of rapamycin (TOR) signalling network plays a pivotal role in sugar metabolism and plants growth. In this article, we made use of the grape (*Vitis vinifera*) calli as experiment materials to explore the function of *VvTOR* gene and protein. By dual-luciferase reporter system, We found that *VvTOR* promoter could respond to ABA (Abscisic Acid) signal and *VvTOR* 1200 bp promoter fragment had stronger activity. By the treatment of AZD8055, an inhibitor of VvTOR, the sugars (glucose, sucrose, fructose) contents of grape calli had different changes and the growth of grape calli could be repressed. We further found that VvTOR could affect grape growth and sugar metabolism genes expression under the different treatments of ABA and AZD8055. These results provide a new evidence to support the viewpoint that VvTOR could respond to ABA signal and affect sugar related genes expression in grapes.

*Keywords: Vitis vinifera, ABA, AZD8055, grape calli, sugar metabolism, target of rapamycin.*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1

**ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ РЕГУЛЯЦИИ ЭКСПРЕССИИ ГЕНОВ  
МЕМБРАНОСВЯЗАННОЙ СУБЪЕДИНИЦЫ С СУКЦИНАТДЕГИДРОГЕНАЗЫ В  
ПРОРАСТАЮЩИХ СЕМЕНАХ КУКУРУЗЫ**© 2022 г. А. Т. Епринцев<sup>а, \*</sup>, Д. Н. Федорин<sup>а</sup>, О. Х. Флорес Каро<sup>а</sup><sup>а</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Воронежский государственный университет”, Воронеж, Россия

\*e-mail: bc366@bio.vsu.ru

Поступила в редакцию 28.06.2021 г.

После доработки 29.07.2021 г.

Принята к публикации 04.08.2021 г.

Активация или репрессия транскрипции гена обусловлена уровнем метилирования, особенно в CG-последовательностях в промоторной области гена. При прорастании семян регуляция ЭТЦ митохондрий может определяться на уровне сукцинатдегидрогеназы (СДГ), в частности, корреляцией между уровнем метилирования промоторов генов, кодирующих мембраносвязанные субъединицы СДГ и их экспрессией. Проведена оценка степени метилирования промоторов генов *SDH3-1* и *SDH3-2*, кодирующих мембраносвязанную субъединицу С СДГ, при прорастании семян кукурузы (*Zea mays* L., сорт Воронежская 76). Результаты бисульфитного секвенирования ампликонов исследуемых генов показали, что в первый день прорастания семян CG-последовательности в промоторной области гиперметилированы, т.е. метильный статус составлял 100%. В последующие дни уровни метилирования значительно снизились, и на 8 день прорастания семян этот показатель равнялся 40.0% для *SDH3-1* и 30.8% для *SDH3-2*. Полученные результаты свидетельствуют об увеличении скорости функционирования альтернативной оксидазы (АОХ) по мере прорастания семян кукурузы при стабильном уровне экспрессии гена комплекса I дыхательной цепи. Кроме того, увеличение уровня транскрипции генов мембраносвязанной

субъединицы С СДГ совместно с активацией АОХ указывает на осуществление альтернативного транспорта электронов в ЭТЦ митохондрий, не связанного с синтезом АТФ. Выявлен эпигенетический механизм регулирования экспрессии генов *SDH3-1* и *SDH3-2* субъединицы С СДГ, обеспечивающий альтернативный транспорт электронов на поздних этапах прорастания семян кукурузы. Выявлена прямая зависимость между статусом метилирования CpG-островков промотора гена *SDH3-2* и количеством его транскриптов, что связано, по-видимому, с адаптивной реакцией митохондриального метаболизма на переход клетки с гетеротрофного типа питания на автотрофный.

**Ключевые слова:** *Zea mays*, сукцинатдегидрогеназа, метилирование, субъединица, экспрессия, промотор, CG-динуклеотид, электрон-транспортная цепь.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1

**ОСОБЕННОСТИ РОСТА И СИНТЕЗА ВТОРИЧНЫХ МЕТАБОЛИТОВ В  
КУЛЬТУРАХ *in vitro* *Digitalis lanata* ЕНРН.**

© 2022 г. С. В. Томилова<sup>b</sup>, Д. В. Кочкин<sup>a, b, \*</sup>, Т. М. Тюрина<sup>a</sup>, Е. С. Глаголева<sup>a</sup>, Е. А. Лабунская<sup>a</sup>, Б. А. Галишев<sup>c</sup>, А. М. Носов<sup>a, b, \*\*</sup>

<sup>a</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

<sup>b</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>c</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина”, Екатеринбург, Россия

\*e-mail: [dmitry-kochkin@mail.ru](mailto:dmitry-kochkin@mail.ru)

\*\*e-mail: [al\\_nosov@mail.ru](mailto:al_nosov@mail.ru)

Поступила в редакцию 11.09.2021 г.

После доработки 28.09.2021 г.

Принята к публикации 30.09.2021 г.

Получены ризогенная, каллусная и суспензионная культуры *in vitro* наперстянки шерстистой *Digitalis lanata* и исследованы их ростовые, цитофизиологические и биохимические особенности. Полученные культуры характеризовались удовлетворительными ростовыми характеристиками (индексы роста I в пределах 5–13). Суспензионная культура клеток имела удельную скорость роста  $\mu$  в пределах 0.2–0.3 сут<sup>-1</sup> и для нее была характерна двухфазная ростовая кривая (задержка роста во время экспоненциальной фазы). В полученных культурах методами UPLC-ESI-MS и HPLC-ESI-MS проведено исследование качественного и количественного состава вторичных метаболитов, которое показало отсутствие в них сердечных гликозидов. В то же время во всех исследованных культурах были обнаружены гликозиды фенилэтаноидов и стероидные гликозиды фураностанолового ряда. Общее содержание фенилэтаноидов в каллусной и суспензионной культурах составляло около 0.5%

к сухой биомассе клеток. На основании результатов масс-спектрометрии идентифицировано 10 структур фенолэфаноидов, в том числе дигицилизид А, дигицилизид В, максозид, пурпуразид Е и их метильные производные и изомеры, а также 7 фураностаноловых гликозидов с агликонами тигогенин и гитогенин. Показано, что состав вторичных метаболитов зависит от степени дифференцировки клеток: в ризогенной культуре, состоящей преимущественно из дифференцированных клеток, преобладают фураностаноловые гликозиды, тогда как в каллусной и суспензионной культурах клеток, состоящих из недифференцированных клеток, существенно расширяется разнообразие фенолэфаноидов. Полученные результаты подтверждают выдвинутую в наших предыдущих работах гипотезу о специфичности вторичного метаболизма и его высокой интенсивности в культурах клеток высших растений.

**Ключевые слова:** *Digitalis lanata*, ризогенез, каллусогенез, суспензионная культура клеток, вторичные метаболиты, сердечные гликозиды, стероидные гликозиды, фенолэфаноиды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК581.1

СОДЕРЖАНИЕ АНТОЦИАНОВ В ЦВЕТКАХ СОРТОВ СИРЕНИ  
ОБЫКНОВЕННОЙ (*SYRINGA VULGARIS* L.)

© 2022 г. А. М. Деева<sup>a,\*\*</sup>, П. С. Шабуня<sup>b</sup>, С. А. Фатыхова<sup>b</sup>, А. В. Зубарев<sup>a</sup>, В. Н.  
Решетников<sup>a</sup>, Е. В. Спиридович<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, Минск,  
Республика Беларусь

<sup>b</sup>Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск,  
Республика Беларусь

\*e-mail: a.spirydovich@gmail.com

\*\*e-mail: alladzeeva@gmail.com

Поступила в редакцию 10.09.2021 г.

После доработки 10.10.2021 г.

Принята к публикации 11.10.2021 г.

Впервые методами высокоэффективной жидкостной хроматографии, совмещенной с масс-спектрометрией (HPLC-MS), и рН-дифференциальной спектрофотометрией проведено подробное изучение качественного и количественного состава антоцианового спектра цветков 14 сортов сирени обыкновенной (*Syringa vulgaris* L), относящихся к разным цветовым группам интродуцированных образцов коллекции *in vitro* Центрального ботанического сада НАН Беларуси. На основании результатов хроматографических, спектральных анализов и сравнения их с аутентичными образцами, а также по литературным данным, антоцианы цветков сирени идентифицированы как кумарил-гексозиды или рутинозиды дельфинидина и цианидина. Все сорта условно можно поделить на три группы по наличию и содержанию производных дельфинидина и

цианидина: не содержат (светлые цвета: белые, голубоватые); содержат только производные цианидина (темные цвета); содержат производные дельфинидина и цианидина (сложные цвета: розовато-лиловые, фиолетово-синие, лилово-фиолетовые). Установлено, что содержание антоцианов в зависимости от окраски варьирует, согласно HPLC, цветки либо совсем не содержат антоцианов, либо содержат их в пределах 0.32–3.80 мг/100 г сухого веса; согласно рН-дифференциальной спектрофотометрии, содержат антоциановые пигменты в количестве 0.03–3.71 мг/100 г сухого веса. Полученные данные пополняют информацию о документировании сортов сирени, их описание размещено в сеть Internet на страницах информационно-поисковой системы HBC-Info (<http://hbc.bas-net.by>).

**Ключевые слова:** *Syringa*, рН-дифференциальная спектрофотометрия, антоцианы, HPLC-MS, сирень, цветки.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1:582.9:57.085.23

СОСТАВ ПОЛИФЕНОЛОВ РАСТЕНИЙ *DRACOCERPHALUM CHARKEVICZII* PROB. В УСЛОВИЯХ *IN SITU* и *IN VITRO*© 2022 г. О. В. Наконечная<sup>а, \*</sup>, И. В. Гафицкая<sup>а</sup>, В. П. Григорчук<sup>а</sup>, Т. Ю. Горпенченко<sup>а</sup>,  
А. Б. Безделев<sup>б</sup>, Ю. Н. Журавлев<sup>а</sup><sup>а</sup>Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии  
Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия<sup>б</sup>Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Национальный  
научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского” Дальневосточного отделения  
Российской академии наук – Научно-образовательный комплекс “Приморский океанариум”,  
Владивосток, Россия

\*e-mail: markelova@biosoil.ru

Поступила в редакцию 16.03.2021 г.

После доработки 03.06.2021 г.

Принята к публикации 07.06.2021 г.

Определен состав полифенолов змееголовника Харкевича (*Dracoscephalum charkeviczii* Prob., сем. Lamiaceae) у растений из природной популяции и микрорастений, полученных *in vitro*. В метанольных экстрактах растений методом ВЭЖХ с УФ- и масс-селективным детектированием обнаружено 15 компонентов полифенольной природы, преимущественно, производные кофейной кислоты, а также три гликозилированных флавоноидов – производные акацетина (дигидрокси-метокси-флавоноид). Профили полифенолов в экстрактах микрорастений и растений из природной популяции совпадали. В микрорастениях преобладали розмариновая кислота (в листьях – 63 мкмоль/г сухой массы, в корнях – 11 мкмоль/г сухой массы), кофейная кислота (в корнях – 2 мкмоль/г), рабдозиин (в корнях – 8 мкмоль/г). В корнях растений из природной популяции преобладал рабдозиин в гликозилированной форме (в виде моногликозида – 13 мкмоль/г сухой массы и дикликозида – 4 мкмоль/г сухой массы).

*Ключевые слова:* *Dracoserhalum charkeviczii*, вторичные метаболиты, микроклонирование, *in vitro*.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1:58.07.071

**ВЛИЯНИЕ ЭКЗОГЕННЫХ ИУК И БАП НА МЕТАБОЛИЗМ В ВОСПРИИМЧИВОЙ К РИЗОБИЯМ ЗОНЕ КОРНЕЙ ГОРОХА (*Pisum sativum* L.) В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ ИНОКУЛЯЦИИ**© 2022 г. Л. Е. Макарова<sup>а,\*</sup>, Г. П. Акимова<sup>а</sup>, М. Г. Соколова<sup>а</sup>, И. Г. Петрова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

\*e-mail: makarova@sifibr.irk.ru

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.

Принята к публикации 15.06.2021 г.

В восприимчивом к ризобиям участке корня проростков гороха (*Pisum sativum* L.) изучали проявления реакций в ответ на действие экзогенных ИУК и БАП и контролировали нодуляцию. Показателями реакции служили про/антиоксидантные активности “растворимых” и ионно- и ковалентно связанных с клеточными стенками пероксидаз, содержание экстрагируемых при помощи этилацетата “растворимых” фенольных соединений (ФС), их антирадикальная активность сДФПГ, содержание связанных с клеточными стенками ФС, содержание салициловой кислоты (СК). Для исследования использовали этиолированные проростки гороха, выращенные в условиях термостата с температурой 21°C, в кюветах на влажной фильтровальной бумаге. У исходных 2-суточных проростков на корнях наносили метки на расстоянии 5–20 мм от его кончика (восприимчивая к ризобиям зона) и проростки подвергали одновременно инокуляции бактериями *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* и обработке растворами 10<sup>-11</sup>М ИУК и 10<sup>-9</sup>М БАП. Через 24 ч прослеживали за перемещением помеченного участка, вырезали его для биохимических исследований, а для апикальной части корня, прилегающего к помеченному участку корня, получали цитологические показатели, характеризующие особенности ростовых процессов под влиянием экзогенных фитогормонов (ФГ). Часть инокулированных и подвергнутых действию ФГ проростков оставляли для контроля нодуляции.

Действие экзогенных ФГ приводило к усилению роста корня и смещению, по сравнению с контролем (инокулированные корни без обработки ФГ), восприимчивой к ризобиям зоны, и к небольшому увеличению ее длины. Смещение происходило за счет усиления растяжения вновь перешедших к этому процессу клеток (ИУК) и усиления деления клеток меристемы (БАП). Нодуляция в зоне наблюдений осуществлялась и даже усиливалась под влиянием БАП, но ингибировалась при действии ИУК. Представленные биохимические показатели позволяют предположить, что проявления защитных реакций в исследуемой зоне корня существенно выше в варианте с ИУК, что может служить объяснением негативного влияния экзогенной ИУК на нодуляцию.

**Ключевые слова:** *Pisum sativum*, корень, нодуляция, экзогенные ИУК и БАП, пероксидазы, фенольные соединения, салициловая кислота.

## RESEARCH PAPERS

**Genome-Wide Characterization and Expression Analysis of the Abscisic Acid Receptors  
PYR/PYL/RCAR (PYLs) in Chinese Cabbage During Abiotic Stresses**

**X. X. Fu<sup>a, d</sup>, J. Tang<sup>b</sup>, C. W. Zhang<sup>c</sup>, and L. W. Gao<sup>a, d, \*</sup>**

<sup>a</sup>*College of Life Sciences, Gannan Normal University, Ganzhou, China*

<sup>b</sup>*Institute of Leisure Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing, China*

<sup>c</sup>*College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, China*

<sup>d</sup>*Ganzhou Key Laboratory of Greenhouse Vegetable/College of Life Sciences, Gannan Normal  
University, Ganzhou, China*

*\*e-mail: gaoliwei@gnnu.edu.cn*

Received March 19, 2021; revised August 03, 2021; accepted August 31, 2021

**Abstract** – The plant phytohormone abscisic acid (ABA) plays important roles in plant development. The ABA receptors PYR/PYL/RCAR (PYLs) interact with the type 2C protein phosphatases (PP2Cs) in response to ABA. In the present study, 25 homologous *PYL* genes (*BrPYLs*) were identified in the Chinese cabbage (*Brassica rapa subsp. pekinensis* (LOUR.) HANELT) genome, which were annotated onto all of the 10 chromosomes and 3 sub-genomes in Chinese cabbage. The whole genome annotation and gene structures were predicted and analyzed. The selection pressures and divergence timings of duplicated genes were analyzed. Phylogenetic analysis of *BrPYLs*, along with their *Arabidopsis* counterparts, divided into three subfamilies. In addition, *in silico* transcript expression analysis showed some *BrPYLs* had high expression levels in different tissues. Real-time RT-PCR analysis revealed that 10 *BrPYLs* are highly responsive to abiotic treatments. 6 out of the 25 *BrPYL* genes were highly induced by different abiotic stresses, which might be utilized to improve the abiotic tolerance of Chinese cabbage. Taken together, this study provides genetic information of the *BrPYL* gene family in Chinese cabbage, which may play several roles in plant defense environmental changes. This work may be useful for future functional analysis of other *BrPYL* genes in Chinese cabbage.

*Keywords:* *Brassica rapa* subsp. *pekinensis*, genome-wide characterization, expression analysis, *BrPYLs*, abiotic stresses

## RESEARCH PAPERS

**Gene and Metabolite Co-Analysis Through Transcriptome and Metabolome Provide New Insight into Drought Stress Tolerance in *Tillandsia* (*Bromeliaceae*)****C. Ma<sup>a, b</sup>, B. B. Guo<sup>a, b</sup>, S. Zhou<sup>a, b</sup>, J. Zhang<sup>a, b</sup>, K. Xv<sup>c</sup>, D. H. Sheng<sup>a, b</sup>, M. Y. Wang<sup>a, b</sup>, and Y. L. Feng<sup>a, b, \*</sup>**<sup>a</sup>*College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan province, P.R. China*<sup>b</sup>*Dry-Land Agricultural Engineering Technology Research Center in Henan, Luoyang 471023, Henan province, P.R. China*<sup>c</sup>*Department of Agriculture and Rural Affairs of Shanzhou District, Sanmenxia 472100, Henan province, P.R. China**\*e-mail: fengyalan2004@163.com*

Received July 05, 2021; revised August 20, 2021; accepted August 25, 2021

**Abstract** – Epiphytic *Tillandsia* mainly absorbs moisture and nutrients from the air through its leaves. However, the drought resistance of epiphytic *Tillandsia* is strong, the drought response mechanism and regulatory network are poorly understood. This study adopted metabolomics combined with transcriptomics sequencing technology to analyze the metabolites and their content changes in seedlings of epiphytic *Tillandsia* variety ‘Cotton candy’ under dehydration. In total, 635 metabolites were identified, of which 102 were significantly different and belonged to 17 categories. Among them, phenylpropanine, lipids, amino acids and derivatives contained the most types of compounds, 17, 17, 14 respectively. Transcriptome sequencing acquired a total of 6710 differentially expressed genes, of which 2335 and 4375 were up-regulated and down-regulated separately. After the differentially expressed genes were annotated to the GO, the binding, cell and cell part, cellular process dominate the molecular function, cellular component, and biological process, respectively. Correlation analysis of metabolome and transcriptome showed that amino

acids and their derivatives in Cotton candy under water privation were the most accumulated metabolites, followed by organic acids and their derivatives. The major metabolites and pathways of Cotton candy in response to drought stress acquired in this investigation, laying a foundation for the research on mechanisms of drought resistance and metabolic regulation in epiphytic *Tillandsia* plants.

*Keywords: Tillandsia, drought, metabolite profiling, transcriptome analysis.*

## RESEARCH PAPERS

**Changes in the Differentially Expressed Proteins and Total Fatty Acid Contents in Winter Rapeseed (*Brassica rapa* L.) Leaves Under Drought Stress**

C. Mi<sup>a</sup>, Q. Wang<sup>a, b</sup>, Y. N. Zhao<sup>c</sup>, C. L. Zhang<sup>d</sup>, C. Sun<sup>a</sup>, Z. G. Liu<sup>e</sup> \*, and L. B. Lin<sup>a</sup> \*\*

<sup>a</sup> College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming China

<sup>b</sup> Horticultural Institute of Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming China

<sup>c</sup> Vegetable Research Institute, Tibet Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa China

<sup>d</sup> College of Tropical Crop Science, Yunnan Agricultural University, Pu'er China

<sup>e</sup> Gansu Agricultural University, Lanzhou China

\*e-mail: 739015868@qq.com

\*\*e-mail: linliangbin-63@163.com

Received June 04, 2021; revised July 29, 2021; accepted July 29, 2021

**Abstract**—A study on physiological, biochemical and differential protein expression response mechanisms was conducted by with two breeds of winter rapeseed (*Brassica rapa* L.), DR-7 (drought resistant) and Tianyou 5 (drought sensitive), under drought stress. The results showed that leaves in winter rapeseed wilted, the edge of the leaf gradually withered, the relative water content in the leaf decreased and the contents of osmotic regulatory substances and malondialdehyde in the leaf rose with increasing drought intensity due to cell membrane damage under dry conditions. Twenty-three differentially expressed proteins (DEPs) were selected by two-dimensional gel electrophoresis with liquid chromatography mass spectrometry (LC-MS) analysis under drought stress; These proteins were related to lipid metabolism, protein/amino acid metabolism, metabolic pathways, linoleic acid metabolism, oxidative phosphorylation processes, response to stress, energy metabolism and photosynthesis. Among the DEPs, three were involved in ATP metabolism and

three in fatty acid metabolism. Furthermore, with increasing drought intensity, the activities of  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase and  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -ATPase in leaves gradually decreased; The content of saturated fatty acids (SFAs) in membrane system significantly increased, which together with the enzyme activity is crucial to cell metabolism; And polyunsaturated fatty acids (PUFAs) slightly increased. According to the results, the damage in membrane system due to SFAs was alleviated by the increase of PUFA content, increasing the ability of winter rapeseed to resist drought. Overall, the increase of osmotic regulatory substances contents and the decrease in osmotic potential in winter rapeseed due to drought stress improve water absorption and regulate the expression of related proteins. thus improving resistance to drought. Increasing of PUFA content were advantageous to the function of the membrane-bound enzyme ATPase.

*Key words: Brassica rapa, winter rapeseed, differentially expressed proteins, DEPs, drought stress, ATPase, fatty acid.*

## RESEARCH PAPERS

### Functional Genomic Analysis of the *SPL9* Gene in *Arabidopsis thaliana* Under Low Phosphate Conditions

K.-J. Lei<sup>a, \*</sup> and H. Dong<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Pharmacy Institute of Henan University, Kaifeng 475004, China*

<sup>b</sup> *Key Laboratory of Plant Molecular Physiology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China*

\**e-mail*: leikajian@126.com

Received June 15, 2021; revised September 03, 2021; accepted September 09, 2021

**Abstract** – Inorganic phosphate (Pi) is an essential nutrient, which is often served as a limiting factor in plant growth. It has been reported that SPL family members, such as SPL3, regulate Pi deficiency responses by controlling the expression of Pi deficiency responsive genes. To elucidate whether SPL9 respond to low phosphorus stress, we investigated the phenotypes and conducted RNA sequencing analysis in transgenic *Arabidopsis thaliana* with overexpressing rSPL9 (R9) under conditions of both normal and low Pi availability. Compared with wild-type plants, R9 showed decreased anthocyanin accumulation and increased Pi contents in shoots under Pi deficiency. Through RNA-seq analysis compared with wild-type plants, we detected 217 genes significantly differentially expressed in conditions of Pi sufficiency, and 121 genes differentially expressed in conditions of Pi deficiency in R9 plants. Under Pi deficiency, MYB62 and ZAT6 are two important differentially expressed genes (DEGs) that both regulate the Pi uptake processes. In addition, these DEGs included multiple protein kinases, jasmonic acid response genes and genes related to salt stress responses. Genes associated with hydrolase and transferase activity were also differentially regulated by Pi deficiency, such as cytochrome P450 monooxygenases. Of particular note, the transcription factor AP2-EREBP and members of the bHLH family were among the most significantly differentially regulated genes identified under both Pi sufficient and Pi deficient conditions. In conclusion, our analysis of the R9 transcriptome highlights the importance of SPL9 under conditions of Pi-deficiency. Except for stress and defense response genes, the R9

transcriptome also characterized the induction of ethylene or jasmonic acid signaling under Pi deficiency.

*Keywords:* *Arabidopsis thaliana*, Pi deficiency, SPL9, anthocyanin accumulation, Pi contents, transcriptional analysis

*Abbreviations:* R9 – overexpression of rSPL9.

## RESEARCH PAPERS

### **Low Temperature Plasma Affects Physiological and Genetic Attributes of *Foeniculum vulgare***

**A. Asnavandi<sup>a</sup>, G. Barzin<sup>a,\*</sup>, T. Davari Mahabadi<sup>b</sup>, M. Entezari<sup>c</sup> and L. Pishkar<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Department of Biology, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran.*

<sup>b</sup>*Department of Physics and Biophysics, Faculty of Health, Tehran Medical Sciences, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

<sup>c</sup>*Farhikhtegan Medical Convergence sciences Research Center , Farhikhtegan Hospital Tehran Medical sciences ,Islamic Azad University, Tehran,Iran.*

*\*e-mail: gitibarzin@iiu.ac.ir*

*Received November 13, 2020; revised August 5, 2021; accepted August 5, 2021*

**Abstract**– The present study aimed to determine the effects of low-temperature plasma (LTP) on seed germination, physiological, and genetic features of *Foeniculum vulgare* Mill. Fennel seeds were divided into four groups: a control group and three experimental groups. The experimental groups were exposed to LTP for 5, 10, and 20 min. Then the seeds of the experimental and control groups were grown for 21 days. Subsequently, total sugar levels, activity and expression of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and ascorbate peroxidase (APX) enzymes, total flavonoids, and malondialdehyde (MDA) levels in both LTP-treated seeds and the control group were examined. Results showed that the concentration of sugar in the experimental groups increased significantly in comparison with the control group. SOD activity in 5 min, CAT in 5 and 10 min, and APX in all LTP treatments increased significantly compared with the control group. In addition, the expression of genes encoding these enzymes significantly increased in all groups. LTP treatments also increased total flavonoids and significantly reduced MDA. The study concluded that priming of the fennel seeds with low-temperature plasma treatment may increase their germination and vigor and improve plants' resistance by changing their antioxidant system.

*Keywords: Foeniculum vulgare, low-temperature plasma, antioxidant systems, seed priming.*

**RESEARCH PAPERS****Physiological Studies on *Sulla carnosa* Growth, Ionic Compartmentation and Oxidative Stress under Salt Stress****A. Bouzidi<sup>a, b</sup>, M. Chaieb<sup>b</sup>, H. Ellouzi<sup>c</sup>, A. Krouma<sup>a, \*</sup>***<sup>a</sup>Research Unit Valorization and Optimization of Resource Exploitation, Faculty of Sciences and Techniques of Sidi Bouzid, University of Kairouan, Tunisia**<sup>b</sup>Research Laboratory Plant Biology and Ecophysiology in arid lands, Faculty of sciences of Sfax, University of Sfax, Tunisia**<sup>c</sup>Centre of Biotechnology of Borj Cedria, Borj Cedria Ecopark, BP 901, Hammam Lif 2050**\*e-mail: abdelmajid.krouma@fstbsz.u-kairouan.tn*

Received August 08, 2021; revised August 31, 2021; accepted September 03, 2021

**Abstract** – Salinity stress causes several physiological, biochemical and molecular damages in plants; however, few of them can tolerate the high salinity in their rhizosphere. *Sulla carnosa* (Desf.) is a legume forage species occupying the saline depressions of Tunisia. To explain the distribution of this species and investigate its response to salinity, a greenhouse experiment was conducted on plants cultivated in different NaCl concentrations (0, 100, 200 and 250 mM). Seeds were harvested from the natural biotope, Sabkha d'El Kelbia (35°50'34" North, 10°16'18" East). Plant growth, ionic repartition, oxidative stress and antioxidant enzyme activities were investigated. special interest was attributed to the interrelation between some physiological and biochemical key parameters in order to scrutinize the mechanisms that control the response of the plant to salinity. Obtained results demonstrated that soil salinity increased sodium accumulation, MDA and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> contents and antioxidant enzymes such as SOD, CAT, and GPX with a significant decrease of biomass production, water use efficiency and potassium concentration. This forage legume revealed important tolerance to salinity with the capacity to grow until 250 mM NaCl. It allocates more potassium to shoots to avoid the excessive accumulation of the toxic ion, develops an efficient antioxidant system to detoxify the plant cells from high ROS accumulation, and maintains adequate water use efficiency.

**Keywords:** *Sulla carnosa*, catalase, glutathione peroxidase, ionic repartition, salinity, superoxide dismutase, water use efficiency.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1

**ВЛИЯНИЕ 24-ЭПИКАСТАСТЕРОНА И ЕГО МОНОСАЛИЦИЛАТА НА  
СОЛЕУСТОЙЧИВОСТЬ *Arabidopsis thaliana* ДИКОГО ТИПА И  
САЛИЦИЛАТДЕФИЦИТНЫХ ТРАНСФОРМАНТОВ *NahG***

© 2022 г. Р. П. Литвиновская<sup>a</sup>, М. А. Шкляревский<sup>b</sup>, Ю. Е. Колупаев<sup>b, \*</sup>, А. И. Кокорев<sup>b</sup>,  
В. А. Хрипач<sup>a</sup>, А. П. Дмитриев<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси,

Минск, Беларусь

<sup>b</sup>Харьковский национальный аграрный университет им. В. В. Докучаева, Харьков, Украина

<sup>c</sup>Институт клеточной биологии и генетической инженерии Национальной академии наук  
Украины, Киев, Украина

\*e-mail: [plant.biology.knau@gmail.com](mailto:plant.biology.knau@gmail.com)

Поступила в редакцию 11.08.2021 г.

После доработки 20.08.2021 г.

Принята к публикации 20.08.2021 г.

Исследовано влияние 24-эпикастастерона (ЭК) и его конъюгата с остатком салициловой кислоты (2-моносалицилата ЭК – МСЭК) на устойчивость растений *Arabidopsis thaliana* L. дикого типа (Col-0) и трансформированных геном бактериальной салицилатгидроксилазы (*NahG*) к 24-часовому воздействию 175 мМ NaCl. Обработка ЭК в диапазоне концентраций от 0.01 до 1 мкМ оказывала положительное влияние на солеустойчивость растений дикого типа, что проявлялось в снижении под его влиянием интенсивности ПОЛ, стабилизации пула хлорофилла и повышении содержания каротиноидов после действия NaCl. Еще более выраженный защитный эффект на растения Col-0 оказывал МСЭК. Под влиянием ЭК в условиях солевого стресса у растений дикого типа повышалась активность антиоксидантных

ферментов каталазы и гваяколпероксидазы, а при обработке МСЭК происходило значительное повышение активности супероксиддисмутазы и каталазы. В то же время обработка как ЭК, так и МСЭК не изменяла активность антиоксидантных ферментов у растений *NahG*, которые не способны накапливать салициловую кислоту. Также воздействие ЭК или МСЭК на салицилатдефицитные растения *A. thaliana* не изменяло интенсивности ПОЛ и содержания фотосинтетических пигментов при солевом стрессе. Сделано заключение об участии салициловой кислоты в реализации защитного действия brassinosterоидов на растения в условиях интенсивного засоления и перспективности применения МСЭК для повышения солеустойчивости растений.

**Ключевые слова:** *Arabidopsis thaliana*, 24-эпикастастерон, 2-моносалицилат 24-эпикастастерона, антиоксидантная система, brassinosterоиды, салициловая кислота, солеустойчивость.

## RESEARCH PAPERS

### **Effects of Potassium and Sodium Bromides on *Triticum aestivum* and *Pisum sativum***

**I. Shtangeeva<sup>a, \*</sup>, M. Niemelä<sup>b</sup>, P. Perämäki<sup>b</sup>, E. Kurashov<sup>c, d</sup>, and Yu. Krylova<sup>d</sup>**

<sup>a</sup> *Institute of Earth Sciences, St. Petersburg University, St. Petersburg, 199034 Russia*

<sup>b</sup> *Research Unit of Sustainable Chemistry, University of Oulu, PO Box 3000, FI-90014 Finland*

<sup>c</sup> *St. Petersburg Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography", St. Petersburg, 199053 Russia*

<sup>d</sup> *Institute of Limnology, St. Petersburg Federal Research Center of Russian Academy of Sciences, 196105 St. Petersburg Russia*

*\*e-mail: shtangeeva@gmail.com*

Received July 09, 2021; revised July 21, 2021; accepted July 22, 2021

**Abstract** – Different bromine compounds have found numerous applications. Nevertheless, there is still insufficient information about environmental chemistry of this trace element. In our research, a greenhouse pot experiment was carried out with the following aims: (1) to study the response of wheat and pea seedlings to an increase of concentrations two bromides (KBr and NaBr) in soil, (2) to assess the influence of root exudates of the two plant species on uptake of Br and some other macro- and trace elements when wheat and pea grow close to each other or far apart, and (3) to estimate possible allelopathic effects on the uptake of different elements by plants and also on the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in uncontaminated soil and in the soil contaminated by bromides. Both plant species were capable of accumulating large amounts of bromine. The concentration of bromine in roots of pea was higher than in wheat roots, and was always higher in leaves of wheat than in leaves of pea. More bromine was accumulated in roots of wheat and pea seedlings growing separately than in roots of the seedlings grown close to each other. Growth of wheat and pea seedlings in uncontaminated and spiked with bromides soils resulted in

decrease of the concentrations of some polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere soil of the plants. The variations depended on the plant species and were different when the plants were grown close to each other and separately.

***Keywords: Triticum aestivum, Pisum sativum, wheat, pea, bromine, root exudates, polycyclic aromatic hydrocarbons.***

**RESEARCH PAPERS****Morpho-Physiological and Biochemical Tolerance Mechanisms in Two Varieties of *Oryza sativa* to Salinity****S. Srivastava<sup>a</sup>, P. K. Sharma<sup>a, \*</sup>**<sup>a</sup>*Department of Botany, Goa University, Taleigao, Goa, India**\*e-mail: pksharma@unigoa.ac.in*

Received June 21, 2021; revised July 12, 2021; accepted July 12, 2021

**Abstract** – One of the major detrimental factors of the global rice production is salt stress, which limits it up to 50%. In this study, we compared the morphophysiological and biochemical responses of indigenous salt-tolerant ‘Korgut’ and salt-sensitive ‘Jaya’ rice (*Oryza sativa* L.) varieties by pot culture in controlled climatic conditions. Decreased plant growth and biomass with the increase in salinity were recorded in the ‘Jaya’ variety compared to those of ‘Korgut’. Net photosynthesis rate ( $P_N$ ), transpiration rate ( $E$ ), stomatal conductance ( $g_s$ ), internal CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ), photochemical quenching, and lower quantum efficiency of PSII system ( $F_v/F_m$  ratio) were recorded reduced in ‘Jaya’ compared to those of ‘Korgut’ as response to salinity stress. Unlike ‘Korgut’ that thrived well under increased salinity levels, higher concentration (160 mmol/l) of NaCl caused a decrease in the number of thylakoids. In addition, swelling of the thylakoids was observed in ‘Jaya’ in response to higher salt stress. The tolerance of ‘Korgut’ plants was mainly due to relatively lesser accumulation of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> and higher accumulation of K<sup>+</sup>. ‘Korgut’ showed relatively higher antioxidant capacity, lower osmotic stress (proline), and oxidative damage (lipid peroxidation) compared to salt-sensitive variety ‘Jaya’. Our data suggests that ‘Korgut’ plants preserve ion and water homeostasis and diminish oxidative stress resulting from more significant antioxidant enzymes, which enables better sustainable growth overcoming salinity stress, contrary to salt-sensitive ‘Jaya’ variety. These findings can support crop development in terms of salt tolerance in rice crops by the method of molecular genetics.

**Keywords:** *Oryza sativa*, chloroplast ultrastructure, germination, ion accumulation, photosynthesis, reactive oxygen species.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1+576.311.5. +577.352.3+577.23

**НАТРИЙ  $\mu$ 2-ДИТИОСУЛЬФАТО-ТЕТРАНИТРОЗИЛДИФЕРАТ ТЕТРАГИДРАТ  
ПРЕДОТВРАЩАЕТ ОБУСЛОВЛЕННУЮ ТЕПЛОВЫМ ШОКОМ ДИСФУНКЦИЮ  
МИТОХОНДРИЙ**© 2022 г. **И. В. Жигачева<sup>a,\*</sup>, В. И. Бинюков<sup>a</sup>, И. П. Генерозова<sup>b</sup>, Е. М. Миль<sup>a</sup>, Н. И.  
Крикунова<sup>a</sup>, М. М. Расулов<sup>c</sup>, А. А. Албантова<sup>a</sup>**<sup>a</sup>*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва, Россия*<sup>b</sup>*Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук,  
Москва, Россия*<sup>c</sup>*Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии  
элементоорганических соединений, Москва, Россия*\*e-mail: [zhigacheva@mail.ru](mailto:zhigacheva@mail.ru)

Поступила в редакцию 02.03.2021 г.

После доработки 12.04.2021 г.

Принята к публикации 13.04.2021 г.

Исследована возможность использования донора NO натрий  $\mu$ 2-дитиосульфато-тетранитрозилдиферрат тетрагидрата (ТНКЖ-тио) в качестве препарата, предупреждающего дисфункцию митохондрий при стрессовых воздействиях. Свойства ТНКЖ-тио изучали на митохондриях 5-дневных этиолированных проростков гороха. Определяли функциональное состояние митохондрий в условиях теплового шока (ТШ) и обработки проростков ТНКЖ-тио. Тепловой шок активировал перекисное окисление липидов, приводил к набуханию митохондрий и изменениям в содержании  $C_{18}$  жирных кислот (ЖК): индекс ненасыщенности  $C_{18}$  ЖК в мембранах митохондрий снижался с  $1.42 \pm 0.01$  до  $1.22 \pm 0.01$ . Происходили изменения и в содержании  $C_{20}$  ЖК: содержание 20:3 $\omega$ 6 снизилось почти на 43.6%, а содержание 20:0 сократилось в 1.3 раза. Изменение пула ненасыщенных ЖК отразилось на биоэнергетических характеристиках митохондрий: наблюдалось почти 1.5-кратное падение скоростей окисления НАД-зависимых субстратов окисления. Обработка семян гороха  $10^{-6}$  М ТНКЖ-тио сопровождалась предотвращением перекисного окисления липидов (ПОЛ), предупреждением изменений в составе ЖК мембран и морфологии митохондрий, а также

восстановлением биоэнергетических характеристик этих органелл. Предотвращая ПОЛ, препарат мог способствовать поддержанию функционального состояния митохондрий при стрессе. Результатом этого, возможно, явилось сохранение эффективности энергетических процессов в клетке, что, вероятно, повысило устойчивость организма к изменяющимся условиям внешней среды.

***Ключевые слова: Pisum sativum, донор оксида азота, тепловой стресс, ПОЛ, митохондрии, жирные кислоты.***

---

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.1

**ВЛИЯНИЕ ДЕФИЦИТА КРИПТОХРОМОВ 1 И 2 НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ И ПРО-АНТИОКСИДАНТНЫЙ БАЛАНС В ЛИСТЯХ РАСТЕНИЙ *Arabidopsis thaliana* ПРИ ДЕЙСТВИИ УФ-В<sup>1</sup>**

□ 2022 г. А. Ю. Худякова<sup>а, \*</sup>, В. Д. Креславский<sup>а</sup>, А. Н. Шмарев<sup>а</sup>, Г. Н. Ширшикова<sup>а</sup>, В. Ю. Любимов<sup>а</sup>, А. А. Кособрюхов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Федеральный исследовательский центр “Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук”,

Пушино, Россия

\*e-mail: s\_t\_i\_m\_a\_@mail.ru

Поступила в редакцию 17.04.2020 г.

После доработки 22.03.2021 г.

Принята к публикации 07.05.2021 г.

Изучено влияние УФ-В-радиации (1 Вт/м<sup>2</sup>, 1 ч) на фотохимическую активность ФС II, скорость фотосинтеза P<sub>n</sub>, содержание фотосинтетических и УФ-поглощающих пигментов (УФПП), активность антиоксидантных ферментов (каталазы и пероксидазы), а также на содержание H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> у 25-дневных растений *Arabidopsis thaliana* дикого типа (ДТ) (экотип Landsberg erecta) и мутанта, дефицитного по криптохромам 1 и 2 (*cry1cry2*), выращенных на красном (КС), белом (БС) и синем свете (СС) при интенсивности света 130 мкмоль квантов/(м<sup>2</sup> с). Также изучена экспрессия генов фактора транскрипции (*HY5*), биосинтеза флавоноидов (*CHS*, *PAL*) фитохромобилинсинтазы (*HY2*), протохлорофиллид-оксидоредуктазы (*POR-A*), стромальной (*sAPX*) и тилакоидной (*tAPX*) аскорбатпероксидаз. УФ-В-облучение приводило к снижению величины P<sub>n</sub> и фотохимической активности ФС II (флуоресцентные параметры F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>, P<sub>IABS</sub>) растений ДТ и мутанта, выращенных на БС, КС и СС. При этом у растений *cry1cry2*, выращенных на СС, но не на КС и БС, наблюдали большее ингибирование активности ФС II и скорости фотосинтеза по сравнению с ДТ. Содержание УФПП у *cry1cry2*, выращенных на СС, было заметно ниже, чем у ДТ, тогда как на КС и БС разница не обнаружена. При действии УФ-В-радиации содержание УФПП во всех вариантах не менялось. У растений, выращенных на СС, активность каталазы и пероксидазы у ДТ была заметно выше, чем у мутанта, как до, так и после облучения УФ-В. У ДТ на БС после облучения активность пероксидазы возрастала, а у мутанта снижалась, но

возрастало содержание  $H_2O_2$ . У мутантных растений, выращенных на СС, уровни транскрипции генов *tAPX*, *sAPX*, *PAL*, *HY5*, *HY2* и *POR-A* были снижены по сравнению с ДТ. Мы предполагаем, что сниженная устойчивость фотосинтетического аппарата к УФ-В у растений *cry1cry2* связана с низким содержанием УФПП и с пониженной активностью пероксидазы и каталазы в листьях мутантных растений.

**Ключевые слова:** *Arabidopsis thaliana*, фотосинтез, антиоксидантные ферменты, ФС II, стресс-устойчивость, УФ-В, криптохромы, мутант.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 581.151:574.583

**ВЛИЯНИЕ СВЕТА НА ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК КОККОЛИТОФОРИДЫ *EMILIANA HUXLEYI***□ 2022 г. Н. Ю. Шоман<sup>а,\*</sup>, Е. С. Соломонова<sup>а</sup>, А. И. Акимов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный  
исследовательский центр “Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского  
Российской академии наук”, Севастополь, Россия

\*e-mail: n-zaichenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.07.2021 г.

После доработки 08.10.2021 г.

Принята к публикации 19.10.2021 г.

Исследовано влияние интенсивности света (в диапазоне от 20 до 850 мкЭ/(м<sup>2</sup> с) на изменение основных структурно-функциональных, цитометрических и флуоресцентных показателей кокколитофориды *Emiliana huxleyi* (Lohmann) Hay & Mohler 1967. Результаты микроскопического и цитометрического анализов показали, что *E. huxleyi* была представлена двумя клеточными формами, покрытыми слоем кальциевых образований – кокколитами и клетками без кокколита, соотношение между которыми изменялось в зависимости от световых условий роста водорослей: повышение интенсивности света от 20 до 850 мкЭ/(м<sup>2</sup> с) приводило к закономерному снижению количества покрытых кокколитами клеток от 90 до 35%. Предложена гипотеза, что уменьшение доли покрытых клеток в популяции с увеличением освещенности может рассматриваться как возможная причина раннего фотоингибирования роста *E. huxleyi* (от 400 мкЭ/(м<sup>2</sup> с)). Применение метода проточной цитометрии позволило выявить ряд существенных различий в флуоресцентных, размерных и структурных показателях клеток *E. huxleyi*, соответствующих двум ее формам: покрытым и непокрытым кокколитами. Установлено, что по объему непокрытые клетки в 2.5–3.5 раза мельче покрытых и отличаются низкими светорассеивающими свойствами – показатель прямого светорассеяния (FS) в 2 раза, а бокового светорассеяния (SS) в 25 раз ниже, чем у клеток, покрытых кокколитами, что позволяет идентифицировать исследуемые группы клеток *E. huxleyi* на цитограммах проточного цитометра, используя автофлуоресценцию

хлорофилла в красной области спектра (канал FL4) и канал SS. Отмеченное свечение в зеленой области спектра (канал FL1), закономерно увеличивающееся с ростом освещенности, также является отличительной чертой клеток, покрытых кокколитами, у непокрытых клеток зеленая автофлуоресценция отсутствует. Полученные в работе результаты позволяют значительно улучшить понимание физиологии *E. huxleyi*, как вида, вызывающего массовые цветения в Черном море, и значительно влияющего на круговорот биогенных и минеральных веществ в морской среде.

**Ключевые слова:** *Emiliana huxleyi*, интенсивность света, кальцификация, кокколитофориды, проточная цитометрия, светорассеяние.