

метры в условиях никелевого стресса, что, вероятно, обусловлено его способностью хелатировать Ni^{2+} , а также редокс-активностью образующихся комплексов, которые могут индуцировать синтез АФК и запускать адаптивные реакции в клетках растений.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект Б24-060) и ГПНИ (№ ГР 20241163)

Библиографические ссылки

1. Мацкевич, В. С. Механизм трансмембранного и дальнего транспорта никеля в высших растениях / В. С. Мацкевич, В. В. Демидчик // Экспериментальная биология и биотехнология. – 2023. – №. 2. – С. 4–29.

2. Серегин И.В., Кожевникова А.Д. Физиологическая роль никеля и его токсическое действие на высшие растения / И.В. Серегин, А.Д. Кожевникова // Физиология растений. – 2006. – Т 53. – С. 285–308.

3. Yaadav N. An account of nickel requirement, toxicity and oxidative stress in plants / N. Yaadav, S. Sharma // Biological forum – an international journal. – 2016. – Vol. 1, № 8. – P. 414–419.

4. Occurrence, physiological responses and toxicity of nickel in plants / T.V.M. Sreekanth [et al.] // Int. J. Environ. Sci. Technol. – 2013. – Vol. 10. – P. 1129–1140.

5. Mechanisms of salinity tolerance / R. Munns, M. Tester // Annu. Rev. Plant Biol. – 2008. – Vol. 59. – P. 651–681.

6. Ингибирование ростовых процессов и индукция запрограммированной клеточной гибели в корне *Helianthus annuus* L. под действием ионов никеля и никель-гистиридиновых комплексов / В.С. Мацкевич и др. // Экспериментальная биология и биотехнология – 2020. – Т. 1. – С. 11-19.

Мелатонин регулирует окислительный и антиоксидантный статус клеточных культур растений *in vitro*

Головацкая И. Ф.^{А*}, Кадырбаев М. К.^А, Бойко Е. В.^А, Лаптев Н. И.^А

^А *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия. *E-mail: golovatskaya.irina@mail.ru*

Мелатонин (Мел) играет важную роль в регуляции роста и развития растений. Он контролирует органогенез корней и побегов и формирование растительных тканей, координирует внутренние ритмы растений с фото-периодами. Мел регулирует прорастание семян, цветение, старение и стрессовые реакции растений в ответ на биотические и абиотические факторы. Важной функцией этого индоламина является регуляция окислительного статуса через изменения уровня вторичных метаболитов. Одной из важных и многочисленных групп фенольных соединений (ФС) служит группа флавоноидов (Фл).

Фл выполняют экологическую функцию, защищая растения от УФ-излучения и света высокой интенсивности, патогенов, осуществляют биологическую коммуникацию в ризосфере, регуляцию транспорта ИУК и его метаболизма, повышают эффективность извлечения питательных веществ во время старения растения, реализуют антиоксидантную функцию. Фл могут играть роль при адаптации отдельных клеток к среде при их культивировании *in vitro*, обеспечивая устойчивую пролиферацию клеток.

Несмотря на повышенное внимание к мелатонину, как гормону сна человека, и важного антиоксиданта в растениях, мало сведений о роли Мел в регуляции роста и метаболизма клеточных культур растений. В связи с этим целью нашего исследования было изучение окислительного статуса и уровня ФС и Фл в клеточных культурах лихниса хальцедонского.

Объект и методика исследований. Объектами служили две культуры, полученные от корневого экспланта проростков *Lychnis chalcidonica* L. Перекисное окисление липидов (ПОЛ) определяли по ТБК-активным продуктам – малоновому диальдегиду (МДА) [1]. Содержание свободного пролина определяли по реакции с нингидрином в кислой среде [2]. Определение суммарного содержания ФС и Фл осуществляли методом спектрофотометрии [3, 4]. Количественное определение индивидуальных Фл проводили методом ВЭЖХ с использованием жидкостного хроматографа Agilent 1260 Infinity с детектором на диодной матрице DAD (Agilent Technologies Inc., США, SHIMADZU, Япония) [5].

Результаты. В ходе эксперимента отметили, что добавление низких концентраций 0,1 нМ Мел в питательную МС-среду увеличивало скорость роста как каллусной, так и суспензионной культуры лихниса хальцедонского. На 28 сутки индекс роста каллусной культуры увеличивался на 25%, что сопровождалось повышением на 88% уровня осмотически активного вещества – пролина. Увеличение окислительного статуса на 17% происходило в ходе активного роста этиолированной культуры, что возможно связано с активацией дыхания. Подобное изменение ТБК-активных продуктов сопровождалось незначительным увеличением суммарного содержания ФС, но существенным снижением на 33% суммарного содержания Фл (табл. 1). Другими Мел-зависимыми высокомолекулярными антиоксидантами служили ферменты супероксиддисмутаза и каталаза [6].

Таблица 1

Влияние мелатонина (Мел) на ростовые параметры и содержание МДА, пролина, фенольных соединений (ФС), флавоноидов (Фл) каллусной клеточной культуры *L. chalconica* на 28 сутки субкультивирования

Вариант	Индекс роста	Содержание, мкмоль/г сырой массы		Содержание, мг/г сухой массы	
		МДА*100	Пролин	ФС	Фл
Контроль	6,75	0,6±0,00	3,02±0,29	9,70±0,16	0,58±0,03
0,1 нМ Мел	8,47	0,7±0,02	5,69±0,15	10,38±0,15	0,39±0,01

Перевод каллусной культуры в суспензионную культуру ускоряло доступ питательных веществ клеткам, что в свою очередь увеличивало прирост биомассы культуры на 20 сутки в 6 раз, тогда как добавление 0,1 нМ Мел в жидкую МС-среду повышало эффективность роста культуры в 12 раз. Осажденный объем из 10 мл суспензии за 10 минут также повышался при действии Мел (табл. 2). Снижение содержания свободного пролина под влиянием Мел могло быть обусловлено его вовлечением в белковый обмен в ходе роста.

Таблица 2

Влияние мелатонина на ростовые параметры и содержание ТБК-активных продуктов (МДА), пролина и фенольных соединений (ФС) суспензионной клеточной культуры *L. chalconica* на 20 сутки субкультивирования

Вариант	Осажденный объем, мл	Сырая масса, г	Сухая масса, г	Содержание, мкмоль/г сырой массы		Содержание ФС, мг/г сухой массы
				МДА*100	Пролин	
Контроль нулевой	1,07 ± 0,01	4,00	-	-	-	-
Контроль 20 суток	1,53±0,01	24,22	1,06	0,78±0,02	3,51±0,27	11,4±0,6
0,1 нМ Мел	1,77±0,02	47,98*	1,81*	0,65±0,03	2,08±0,23	9,7±0,1*

Снижение суммарного содержания Фл было сопряжено с изменением уровня индивидуальных Фл (табл. 3). Получены данные по уровню индивидуальных Фл: дигидрокверцетина, кверцетина и рутина. Эти представители Фл стоят в одном ряду биосинтеза (рис. 1). Содержание рутина и дигидрокверцетина сохранялось на одном уровне как у каллусной, так и суспензионной культуры. В тоже время у активно растущей суспензионной культуры уровень наиболее активного Фл – кверцетина – снижался. Подобные изменения происходили и у каллусной культуры под влиянием Мел. Следовало ожидать, что Мел влиял на активность ферментов, участ-

вующих в преобразовании Фл. В более ранних исследованиях нами показано, что кверцетин находился в небольших количествах и в других каллусных культурах, полученных от разных органов-эксплантов лихниса [7].

Таблица 3

Влияние мелатонина (Мел) на содержание индивидуальных флавоноидов клеточных культур *L. chalcedonica*

Тип культуры, возраст	Вариант	Содержание, мкг/г сухой массы			
		Сумма Фл	Рутин	Кверцетин	Дигидрокверцетин
Каллус, 28 сутки	Контроль	580±30	90,3±19,0	21,8±4,6	204,0±42,8
	0,1 нМ Мел	390±10	<0,01	<0,01	96,6±20,3
Суспензия, 20 сутки	Контроль	420±30	62,9±13,2	<0,01	174,7±36,7

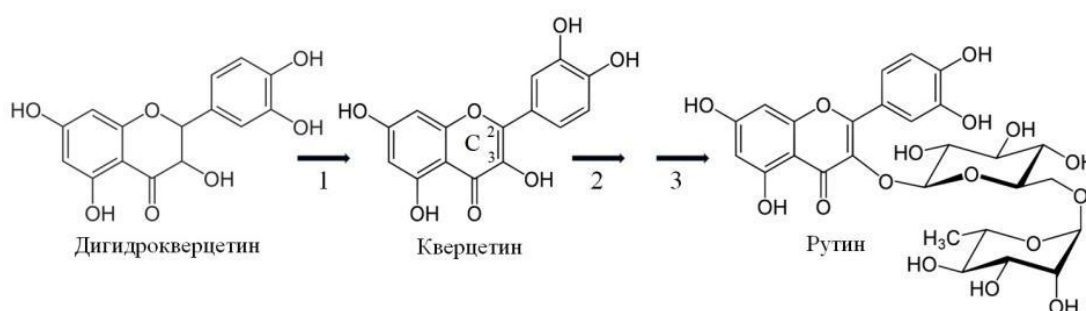


Рис. 1. Схема биосинтеза исследуемых флавоноидов и ферменты их биосинтеза:
1 – флаванолсинтаза; 2 – флавонол 3-О-глюкозилтрансфераза;
3 – флавонол 3-О-глюкозид 6''-О-рамнозилтрансфераза

Таким образом, впервые проведена сравнительная оценка действия мелатонина на индивидуальный состав флавоноидов. Активация роста под влиянием Мел проходила на фоне снижения уровня всех изученных представителей Фл. Наибольшие изменения коснулись рутина и кверцетина. Подобные изменения антиоксидантов поддерживали окислительно-восстановительный статус клеток *in vitro*.

Работа выполнена при поддержке Программы развития ТГУ (Приоритет 2030).

Библиографические ссылки

1. Buege J.A., Aust S.D. Microsomal lipid peroxidation // Meth. Enzymol. 1978. V. 52. P. 302. [https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(78\)52032-6](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(78)52032-6)
2. Bates L.S., Waldran R.P., Teare I.D. Rapid determination of free proline for water stress studies // Plant Soil. 1973. V. 39. P. 205. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
3. Zagorskina N.V., Dubravina G.A., Alyavina A.K., Goncharuk E.A. Effect of ultraviolet (UV-B) radiation on the formation and localization of phenolic compounds in tea plant

callus cultures // Russ. J. Plant Physiol. 2003. V. 50. P. 270.
<https://doi.org/10.1023/A:1022945819389>

4. Ломбоева С.С., Танхаева Л.М., Оленников Д.Н. Методика количественного определения суммарного содержания флавоноидов в надземной части ортилии однобокой (*Orthilia secunda* (L.) House) // Химия растительного сырья. 2008. № 2. С. 65.

5. Шатц В.Д., Сахартова О.В. Высокоэффективная жидкостная хроматография. Основы теории. Методология. Применение в лекарственной химии. Рига: Зинатне, 1988. 220 с.

6. Golovatskaya I.F., Medvedeva Yu.V., Kadyrbaev M. K., Boyko E.V. Specificity of growth and accumulation of flavonoids in plants and cell cultures of *Lychnis chalconica* obtained from explants of different organs // Russian Journal of Plant Physiology, 2024, Vol. 71. P. 24.

7. Golovatskaya I.F., Kadyrbaev M.K., Boyko E.V. Protective role of melatonin and IAA in the regulation of resistance of potato regenerants to cold stress // Potato Research. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11540-023-09642-8>

Кооперативное взаимодействие компонентов антиоксидантной системы и механизмы контроля генерации активных форм кислорода в жизненном цикле зимующих листьев травянистых растений (на примере *Ajuga reptans* L.)

**Головко Т. К.^{A*}, Силина Е. В.^A, Захожий И. Г.^A, Шелякин М. А.^A,
Дымова О. В.^A**

^A Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия,

^{*}E-mail: golovko@ib.komisc.ru

Формирование и функционирование фотосинтетического аппарата (ФСА) находятся под общим контролем растительного организма и постоянно меняющихся условий среды. В сезонном климате умеренного пояса влияние внешних факторов на состояние ФСА наиболее значимо для зимне-зеленых растений. Целью работы было изучение функционирования механизмов антиоксидантной защиты в жизненном цикле листьев *Ajuga reptans* L. и их роли в сохранении фотосинтетического аппарата во время перезимовки растений.

Объект и методы исследования. *Ajuga reptans* L. (живучка ползучая) – длительно вегетирующий летне-зимне-зеленый травянистый многолетник сем. Lamiaceae. В подзоне средней тайги европейского Северо-Востока России активная жизнедеятельность *A. reptans* начинается в середине мая. После схода снежного покрова растения появляются с перезимовавшими, способными фотосинтезировать розеточными листьями, которые в июне завершают свой жизненный цикл и сменяются новой генерацией. Образцы листьев отбирали в летний период (июль), до и во время перезимовки (сентябрь и декабрь), после перезимовки (конец апреля, май,