

Сравнительный анализ морфофизиологических адаптаций листьев различающихся по солеустойчивости видов ячменя к условиям хлоридного засоления

Научный руководитель – Халилова Людмила Абдулгалиевна

Агранова Елизавета Дмитриевна

Студент (бакалавр)

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Биологический факультет, Кафедра физиологии растений, Москва, Россия

E-mail: vetagrach3@gmail.com

Засоление почв поражает 1,4 млрд. га земель (10,7% суши), включая 10% пахотных земель, существенно ограничивая продуктивность злаков за счет осмотической блокады, ионной токсичности Na^+/Cl^- и окислительного стресса. Хлоридное засоление (NaCl -доминантное) провоцирует торможение роста на 30–70%, падение реакционной водообменной способности на 50%, АБК-индуцированное закрытие устьиц и снижение фотосинтеза. Хлоридное засоление выступает мощным фактором естественного отбора и стресса, который запускает у растений комплекс защитных морфофизиологических перестроек. Глубокое понимание механизмов, обеспечивающих солеустойчивость растений, поможет более эффективно адаптировать растения к неблагоприятной среде и повысить урожайность и выживаемость видов, активно используемых в сельском хозяйстве. Из-за важности ячменя как сельскохозяйственной культуры, представляется целесообразным изучить более устойчивых родственников. Известно, что дикорастущие растения чаще растут в суровых условиях окружающей среды, но медленнее, чем большинство культурных, и могут развить особые приспособления, которых нет у последних.

В данном исследовании в качестве модельных объектов для анализа морфофизиологических адаптаций к засолению были выбраны два вида ячменя: культурный (посевной) ячмень *Hordeum vulgare* (солечувствительный) и дикий мышиный ячмень *Hordeum murinum* (относительно солеустойчивый). Сравнительный анализ проводили с использованием комплекса методов исследований: морфологических (световая и сканирующая электронная микроскопия), физиологических (оценка биомассы, оводненности тканей, ионного состава органов, а также элементный анализ клеток методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX)) и биохимических (определение содержания маркеров окислительного стресса).

В результате комплексного сравнительного анализа морфофизиологических адаптаций двух видов ячменя к хлоридному засолению установлено, что дикий вид *Hordeum murinum* обладает более высокой солеустойчивостью по сравнению с культурным *Hordeum vulgare*. У *H. murinum* выявлен комплекс адаптивных признаков, включающий: стабильность параметров устьичного аппарата (сохранение плотности устьиц при умеренном стрессе (100–200 мМ NaCl)), снижение устьичного индекса и уменьшение размеров устьичной щели в 1,5 раза только при экстремальном засолении (300 мМ NaCl), что обеспечивает снижение транспирационных потерь; сохранение оводненности тканей и стабильности анатомической структуры листа, эффективное ограничение поступления токсичных ионов Na^+ и Cl^- в побеги (накопление их преимущественно в корнях), поддержание калиевого гомеостаза за счет аккумуляции K^+ в корневой системе, а также низкий уровень окислительного стресса (минимальное накопление малонового диальдегида). Эти механизмы обеспечивают дикому ячменю более высокую продуктивность (сохранение сырой и сухой биомассы)

и выживаемость в условиях засоления вплоть до 300 мМ NaCl. Полученные данные обосновывают перспективность использования *H. mirinum* в качестве генетического ресурса для селекции солеустойчивых сортов ячменя.

Новый подход к полусинтетическому получению малонильных производных растительных гликозидов

Научный руководитель – Кочкин Дмитрий Владимирович

Афонин Данил Сергеевич

Аспирант

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Биологический факультет, Кафедра физиологии растений, Москва, Россия
E-mail: afondan@gmail.com

Гликозиды в клетках растений могут подвергаться различным модификациям. В частности, малонилирование значительно влияет на физико-химические свойства соединения: оно становится значительно более полярным, приобретает кислые свойства. Малонилирование играет ключевую роль в субклеточной локализации многих соединений, например, в накоплении флавоноидных гликозидов и детоксикации ксенобиотиков [3]. В связи с этим, обнаружение малонилированных гликозидов в растительном материале оказывается важной прикладной задачей.

Выделение и химический анализ малонилированных гликозидов затруднены, так как эти соединения недостаточно стабильны, легко подвергаются самопроизвольному декарбоксилрованию или гидролизу. В связи с этим, оптимальным методом их обнаружения является ВЭЖХ-МС. Однако, необходимые для этого стандарты малонилированных гликозидов либо очень дороги, либо вообще коммерчески недоступны, в связи с чем оказываются востребованы методы их получения из исходных гликозидов, достаточно простые для неспециализированных лабораторий.

Распространенным подходом к получению малонильных производных растительных гликозидов является ферментативная переэтерификация в органических растворителях. Поскольку сама малоновая кислота недостаточно устойчива и реакционноспособна, а ее ангидрид не существует, в качестве субстрата, как правило, используются ее сложные эфиры [2]. Из-за этого требуется дополнительная стадия удаления защитной группы, что усложняет синтез и снижает выход. В связи с этим, был предложен новый подход: использование в качестве малонилирующего агента кислоты Мельдрума, циклического ацетала малоновой кислоты и ацетона.

В качестве модельного гликозида был выбран нарингин, в качестве фермента - иммобилизованная липаза В из *Candida antarctica* (Novozym 435), обладающая исключительной региоселективностью [1]. Реакцию проводили в растворителях на основе трет-амилового спирта в присутствии молекулярных сит при температуре 35,7°C при постоянном перемешивании. Состав реакционных смесей контролировали с помощью ТСХ и УЭЖХ-МС. Нарингин-6'-О-малонат был получен с выходом до 80% и очищен колоночной хроматографией на полиамиде, структура полученного соединения подтверждена методом ЯМР.

Таким образом, была показана возможность одностадийного получения малонилированных гликозидов с использованием кислоты Мельдрума и липазы Novozym 435 для их использования в качестве стандартов для ВЭЖХ-МС.

Источники и литература

- 1) Ortiz, C., Ferreira, M.L., Barbosa, O., dos Santos, J.C., Rodrigues, R.C., Berenguer-Murcia, Á., Briand, L.E., & Fernández-Lafuente, R. Novozym 435: the “perfect” lipase immobilized biocatalyst? *Catalysis Science & Technology*, 2019, 9: 2380-2420.

- 2) Riva, S., Danieli, B., Luisetti, M. A two-step efficient chemoenzymatic synthesis of flavonoid glycoside malonates. *J Nat Prod.*, 1996, 59(6): 618-21.
- 3) Zhao, J., Huhman, D., Shadle, G., He, X.Z, Sumner, L.W., Tang, Y., Dixon, R.A. MATE2 mediates vacuolar sequestration of flavonoid glycosides and glycoside malonates in *Medicago truncatula*. *Plant Cell*, 2011, 23(4):1536-55.

Изменения в морфогенезе и метаболической активности у молодых растений моркови в зависимости от доли синего света в спектре

Научный руководитель – Тараканов Иван Германович

Багрецова Мария Романовна

Аспирант

Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева,
Агрономии и биотехнологии, Физиологии растений, Москва, Россия
E-mail: lol2101bear@mail.ru

В серии из трех экспериментов исследовали влияние спектрального состава света на рост и метаболизм молодых растений моркови *Daucus carota* L., сорт Внучка [1]. В 1-м опыте растения выращивали под монохроматическим светом (синим, зеленым или красным), во 2-м опыте – под дихроматическим при равном соотношении обеих компонент, в 3-м опыте – под трихроматическим с разным соотношением синей (С), красной (К) и зелёной (З) компонент ФАР: 1) С:З:К = 4:1:1; 2) С:З:К = 2:1:1; 3) С:З:К = 1:1:1 [2]. В течение первых 12 суток растения росли под белыми СД (4000К), а с 13-х по 22-е сутки – под светом с исследуемыми спектрами. Растения выращивали в водной культуре в 100 мл стеклянных сосудах с ежедневной сменой питательного раствора при круглосуточном освещении и уровне ППФ (420 ± 30) мкмоль/($m^2 \cdot c$).

Наиболее слабый рост растений отмечали под монохроматическим светом [1,2]. Освещение растений светом с дихроматическим спектральным составом значительно ускоряло рост растений, особенно в варианте с сине-зеленым светом. В условиях трихроматического светодиодного освещения рост растений усиливался по мере увеличения доли синего света в спектре. При этом увеличивалась доля корней в сырой массе целого растения, что указывает на интенсивное ветвление корневой системы, а также возрастала скорость поглощения минеральных элементов, в частности, азота и калия. В то же время увеличение доли красного света в спектре не оказало какого-либо стимулирующего действия на рост растений. Напротив, масса растений в возрасте 22 суток в варианте с 33%-й долей красного света в спектр была ниже в 1,4 и 1,3 (для сырой и сухой массы, соответственно) по сравнению с вариантом, где доля красного света составляла менее 17%. Эти данные указывают, морковь требует значительно более высокой доли синей составляющей в спектре по сравнению, например, с листовыми культурами, по крайней мере на ранних этапах онтогенеза.

Источники и литература

- 1) Беркович Ю. А., Беляк А. М., Багрецова М. Р., Коршунов Д. В., Савостьянова Л. И., Смолянина С. О. Пути повышения эффективности использования почвозаменителя при выращивании корнеплодных культур в космической оранжерее // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2023. – Т. 57, № 4. – С. 97–105. – DOI: 10.21687/0233-528X-2023-57-4-97-105.
- 2) Закурин А. О., Щенникова А. В., Кампионская А. М. Светокультура растениеводства защищенного грунта: фотосинтез, фотоморфогенез и перспективы применения светодиодов // Физиология растений. 2020. Т. 67, № 3. С. 246–258. DOI: 10.31857/S0015330320030227.

Действие затопления на метаболизмом листьев растений риса *Oryza sativa* с различными стратегиями адаптации к гипоксии**Научный руководитель – Емельянов Владислав Владимирович*****Богданова Екатерина Михайловна****Аспирант*

Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: bog.yekaterina2016@yandex.ru

Рис (*Oryza sativa*) является одной из самых распространённых хлебных культур. Изучение разных стратегий адаптаций риса к абиотическим и биотическим стрессам позволяет повысить его урожайность. У риса обнаружено две основные стратегии адаптации: стратегия покоя, контролируемая геном Sub1A, и стратегия избегания, управляемая генами SKs. Сравнительный анализ метаболизма листьев растений риса, произрастающих в условиях частичного затопления в рисовых чеках выявил более 300 метаболитов, представляющих все основные группы соединений центрального метаболизма. Наиболее представлены были соединения углеводного обмена. Метод главных компонент (МГК) показал, что в пространстве первых двух главных компонент профили WT (дикого типа) и Sub1A, а также WT и SK2 образуют отдельные группы. Выявленные различия между генотипами были классифицированы методом OPLS-DA. Модель для генотипов WT и Sub1A характеризовалась предиктивной компонентой (ПК), с которой было связано 24% дисперсии. Основное отличие Sub1A заключалось в дифференциально изменяющихся метаболитах (ДИМ), включающих ненасыщенные свободные жирные кислоты (СЖК) и спирты. При этом уровень моноацилглицеридов и фитостеринов был снижен, а аминокислот (АК), в том числе ГАМК, глутамата и серина – увеличен. Генотип Sub1A характеризовался большим накоплением гексоз, а также С6-сахарокислот. OPLS-DA модель для генотипа SK2 включала ПК, с которой было связано 27% дисперсии. Отличие SK2 состояло в большем накоплении СЖК, степень ненасыщенности которых возрастала, и в интенсивном накоплении АК, в том числе ГАМК, оксипролина, серина и глутамата. Отмечен больший уровень интермедиатов цикла Кребса: цитрата и фумарата, а также аскорбата, глюконата, 2-кетоглюконата и ряда С6-сахарокислот. К числу вторичных соединений, накапливающихся в SK2, следует отнести салицилат. Последующий анализ обогащения (MSEA) выявил биохимические пути, определяющие изменение содержания метаболитов. Оба генотипа (Sub1A и SK2) отличались повышенным уровнем обмена жирных кислот. В то же время для SK2 выражена тенденция к большему накоплению интермедиатов цикла Кребса, окислительного фосфорилирования и обмена АК, в том числе ГАМК. Таким образом, частичное затопление приводило к изменению метаболизма листьев у обоих генотипов, характеризовавшихся разными стратегиями адаптации. Растения Sub1A демонстрировали общее снижение интенсивности обменных процессов, которое сопровождалось накоплением насыщенных ЖК и олигосахаридов. Растения SK2 накапливали больше простых сахаров (гексоз), ненасыщенных СЖК и интенсифицировали обмен АК, в том числе ГАМК. Однако для выявления маркерных метаболитов, характерных для разных стратегий адаптации в растениях риса, требуется продолжение метаболического профилирования.

Исследования поддержаны РНФ №25-14-00074.

Использование метода индукции флуоресценции хлорофилла для изучения онтогенеза растений *Triticosecale*, выращенных в условиях спидбридинга

Научный руководитель – Черноок Анастасия Геннадьевна

Житков Даниил Георгиевич

Студент (бакалавр)

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Биологический факультет, Кафедра биофизики, Москва, Россия

E-mail: daniilzhitkov@gmail.com

Оптимизация протоколов спидбридинга (speed breeding) зерновых культур, в частности тритикале (*Triticosecale* Wittmack), невозможна без детального изучения влияния спектрального состава света на онтогенез. Свет выступает важнейшим регуляторным фактором, определяющим темпы развития, морфогенез и итоговую продуктивность растений в контролируемых условиях. Поиск эффективных световых режимов при использовании управляемого LED-освещения необходим для сокращения селекционного цикла и максимальной реализации генетического потенциала культуры [1]. Для оценки реакций фотосинтетического аппарата (ФСА) тритикале на условия освещения был использован метод регистрации быстрой флуоресценции хлорофилла-а (JIP-тест). Данный инструмент позволяет диагностировать функциональное состояние фотосистемы II через расчет количественных параметров, в частности индекса производительности (PIabs) и максимального квантового выхода (Fv/Fm) [2]. Цель работы — комплексная оценка воздействия спектрального состава света на функциональное состояние ФСА, рост и продуктивность растений *Triticosecale* на ключевых этапах онтогенеза. Методы: 48 линий яровой тритикале (Дублет × Мудрец) изучали при четырех LED-режимах в климатикамерах. Состояние ФСА оценивали JIP-тестом (Handy PEA+) в фазах кущения, колошения и цветения; анализировали фенологию и продуктивность. Результаты показывают, что группа линий с признаком замедленного старения характеризуется пролонгированной функциональной активностью фотосинтетического аппарата с сохранением высоких значений индекса PIabs. Установлено, что смешанный режим освещения (добавление синего и красного спектров) достоверно приводит к задержке цветения и росту продуктивности, что коррелирует со снижением активности фотосистемы II на этапе налива зерна. Несмотря на то, что синий свет обеспечивает повышение фотосинтетической эффективности, данный режим не способствует увеличению урожайности. Полученные данные свидетельствуют о том, что комбинированные спектры оптимизируют перераспределение ресурсов в пользу репродуктивных органов, обеспечивая баланс между скоростью развития и продуктивностью. Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова. Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, Государственное задание FGUM-2024-0002.

Источники и литература

- 1) Jähne F. et. al. Speed breeding short-day crops by LED-controlled light schemes //Theoretical and Applied Genetics. – 2020. – Т. 133 – С. 2335-2342.
- 2) Kalaji H. M. et al. Frequently asked questions about in vivo chlorophyll fluorescence: practical issues //Photosynthesis research. – 2014. – Т. 122. – №. 2. – С. 121-158.

Роль пептидов MEG и EPFL в ответе на стресс у мха *Physcomitrium patens***Научный руководитель – Мамаева Анна Станиславовна***Кокорина Д.А.¹, Беляжова С.Н.², Майборода А.Д.³, Лашманов Г.Н.⁴*

1 - Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И.Скрябина, Москва, Россия, *E-mail: lady.cloudy@bk.ru*; 2 - Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Биологический факультет, Кафедра физиологии растений, Москва, Россия, *E-mail: sonkabella@mail.ru*; 3 - Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН, Москва, Россия, *E-mail: alesandamay@yandex.ru*; 4 - Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Аграрный факультет, Москва, Россия, *E-mail: lashmanovgn@gmail.com*

Группа цистеин-богатых пептидов участвует в регуляции множества процессов, включая морфогенез, размножение, защиту от патогенов и ответ на абиотический стресс, но роль семейств MATERNALLY EXPRESSED GENE (MEG) и EPIDERMAL PATTERNING FACTOR LIKE (EPFL) в этих процессах остается мало изученной. Целью данной работы было выявление роли пептидов семейств MEG и EPF/EPFL в ответе на заражение и абиотический стресс у мха *Physcomitrium patens*, который является удобным объектом системной биологии и позволяет проследить эволюционные закономерности.

Ранее были получены нокаутные мутанты мха *P. patens* по гену MEG (Pr3c3_1170) и одинарные и двойные мутанты по генам EPFL5 (Pr3c2_13490) и EPFL10 (Pr3c6_12270). В контрольных условиях мутанты не отличались от мха дикого типа.

Для мутантов по гену MEG провели скрининг на чувствительность к различным фитогормонам и стрессовым условиям. Не было выявлено значительных отличий мутантов от мха дикого типа по чувствительности к 6-бензиламинопурина (БАП), абсцизовой кислоте (АБК), индол-3-уксусной кислоте (ИУК), метилжасмонату и NaCl. В то же время под влиянием экзогенного пероксида водорода и параквата было выявлено значимое снижение скорости роста мутантов по сравнению с контролем, что дает возможность предположить, что пептиды семейства MEG являются регуляторами ответа на абиотический стресс, в частности на окислительный стресс.

Также у мутантов, нокаутных по гену MEG, была проверена чувствительность к фитопатогенам *Fusarium oxysporum* и *Pectobacterium carotovorum*. Нокауты по MEG не отличались по устойчивости к патогенам от дикого типа. Таким образом, можно сделать предположение о том, что пептиды семейства MEG не участвуют в ответе на заражение данными патогенами.

Ранее для одиночных нокаутных мутантов *erf5* и *erf10* была показана повышенная чувствительность к АБК и метилжасмонату. Нами были проведены аналогичные тесты для двойных нокаутных мутантов по генам EPFL5 и EPFL10. При скрининге чувствительности к действию фитогормонов мутанты *erf5erf10* росли медленнее чем растения дикого типа в присутствии не только АБК и метилжасмоната, но также БАП и ИУК.

Для одинарных нокаутных мутантов *erf5* и *erf10* *P. patens* была проверена чувствительность к фитопатогену *P. carotovorum*. Эти мутанты были более устойчивыми к заражению *P. carotovorum*, чем растения дикого типа. При экзогенном добавлении пептида EPFL10 наблюдался контрастный эффект, а именно снижение устойчивости к патогену.

Полученные результаты позволяют заключить, что цистеин-богатые пептиды семейства MEG могут являться регуляторами ответа на окислительный стресс, а EPFL – негативными регуляторами ответа на биотический стресс.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (Проект № 23-74-10048).

Источники и литература

- 1) Slezina, M.P., E.A. Istomina, E.A., Kulakovskaya, E.V., Abashina, T.N., Odintsova, T.I. Synthetic Oligopeptides Mimicking γ -Core Regions of Cysteine-Rich Peptides of *Solanum lycopersicum* Possess Antimicrobial Activity against Human and Plant Pathogens // *Current Issues in Molecular Biology*. 2021. V. 43. № 3. P. 1226–1242. DOI: 10.3390/cimb43030087.
- 2) Tavormina, P., De Coninck, B., Nikonorova, N., De Smet, I., Cammue, B.P.A. The Plant Peptidome: An Expanding Repertoire of Structural Features and Biological Functions // *The Plant Cell*. 2015. V. 27. № 8. P. 2095–2118. DOI: 10.1105/tpc.15.00440.

**Биоиндикационный аспект изменчивости вегетативных органов растений,
произрастающих в условиях различной антропогенной нагрузки**

Научный руководитель – Белова Татьяна Александровна

Косякова Ольга Евгеньевна

Студент (бакалавр)

Курский государственный университет, Естественно-географический факультет, Курск,
Россия

E-mail: olyakosyakova0@gmail.com

Рост антропогенного загрязнения вызывает морфофизиологические изменения растений, что требует разработки методов мониторинга экосистем [2]. Изучение изменчивости вегетативных органов одуванчика лекарственного выявляет маркеры стресса и адаптивную пластичность. Морфологическая изменчивость служит основой для оценки состояния экосистем и исследований адаптации растений [1].

Целью данной работы было изучение модификационной изменчивости растений территории Курской области в условиях воздействия на них антропогенных факторов среды. Объект исследования – *Taraxacum officinale* L. – пластичный биоиндикатор, чувствительный к загрязнению воздуха, почвы, воды [3]. Отбор листьев производился из биотопов с низкой антропогенной нагрузкой - лесополоса и высокой – территория у автомагистралей/заводов. Для достижения поставленной цели были выполнены измерения анатомо-морфологических показателей растений (длина и ширина листовой пластинки, количество зубчиков и жилок, площадь и степень рассеченности, асимметрия листа) и проведен сравнительный анализ с помощью программы Microsoft Excel.

В результате исследования было доказано увеличение степени ненаследственной модификационной изменчивости у растений, произрастающих в ценозах с высокой степенью антропогенной нагрузки. Происходило формирование листьев с глубокими вырезами, увеличивалась степень асимметрии листа. Из-за накопления токсических веществ при формировании листовой пластины происходила его деформация.

Статистическая обработка позволила выявить четкие различия между растениями из двух контрастных биотопов. Было установлено, что средние значения морфометрических показателей – длины и ширины листовой пластинки, а также ее общей площади – оказались достоверно выше у растений из зоны с низкой антропогенной нагрузкой. Длина и ширина листовой пластинки увеличились на 18% (с 16,4 см до 19,4 см) и 51% (с 3,5 см до 5,3 см) соответственно, а площадь листа стала больше на 56%. То есть у растений, испытывающих антропогенную нагрузку, наблюдалась ксерофитизация листового аппарата как адаптивная реакция, направленная на более экономное расходование влаги, дефицит которой возможен в городской среде.

Количество зубчиков и жилок увеличилось на 13% и 31% соответственно у растений, произрастающих на участках с большой промышленной нагрузкой. У представителей этой группы также установлено увеличение отклонения констант вариационного ряда при измерении всех перечисленных показателей.

Таким образом, в ходе исследования было показано, что антропогенная нагрузка приводила к комплексной перестройке морфогенеза одуванчика лекарственного. Подтвердилось, что этот вид является чувствительным объектом для биоиндикации, а анализ комплекса морфологических параметров позволяет более точно оценить состояние городской среды.

Источники и литература

- 1) Алексеева И.П., Иванова М.А. Морфологические и физиологические признаки растений как биоиндикаторы антропогенного воздействия // Российский журнал ботаники. – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 134–142.
- 2) Лебедева Н.В. Изменчивость вегетативных органов растений при воздействии загрязненной среды // Биология и окружающая среда. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 102–110.
- 3) Чернов В.В. Биологические индикаторы загрязнения окружающей среды. – Москва: Наука, 2014. – 215 с.

Генерация АФК рыльцами растений двух линий *Nicotiana tabacum* с разным уровнем семенной продуктивности

Подобедова Анна Андреевна

Студент (бакалавр)

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Биологический факультет, Кафедра физиологии растений, Москва, Россия

E-mail: 17a2004@mail.ru

В ходе жизнедеятельности в растительных клетках и апопласте образуются активные формы кислорода (АФК) и оксид азота (NO), которые оказывают влияние на вегетативное развитие и размножение растений [1,4]. Регулируя интенсивность образования, удаления и взаимопревращения АФК, ткани пестика могут стимулировать или ингибировать прорастание пыльцы [1]. Известно, что пыльца генерирует NO, при помощи которого взаимодействует с АФК рыльца, способствуя оплодотворению [3].

Nicotiana tabacum – модельный объект для изучения влажного рыльца. Показано, что рыльцевый экссудат табака содержит АФК, а изменение редокс-гомеостаза на рыльце приводит к снижению репродуктивного успеха [2]. Мы проводили исследования на двух линиях табака: сорт Самсун с хорошими товарными качествами, но низким репродуктивным потенциалом, и полученная на его основе линия Фортуна, у которой этот недостаток был скомпенсирован.

Наши исследования показали, что растения Фортуна по сравнению с сортом Самсун имеют более крупные листья и цветки; пестики и тычинки линии Фортуна одинаковой длины, что способствует самоопылению. Размер тычиночных нитей и столбика увеличен у линии Фортуна за счёт более активного деления клеток. Фортуна даёт больше семян и более крупные плоды при опылении стандартной пыльцой и собственной пыльцой, также для данной линии характерно повышение жизнеспособности пыльцы, эффективности прорастания пыльцы *in vitro* в оптимальной среде, ускорение прорастания собственной и стандартной пыльцы на пестике по сравнению с Самсуном. При окрашивании фертильных рылец на внеклеточные АФК и оксид азота оказалось, что суммарное количество АФК у растений Фортуны достоверно больше, а оксида азота меньше, чем у Самсуна.

Таким образом, сравнение двух линий табака показало, что сдвиг баланса между NO и АФК в сторону последних характерно для растений с более успешным семенным размножением.

Источники и литература

- 1) Ali, M.F.; Muday, G.K. Reactive Oxygen Species Are Signaling Molecules That Modulate Plant Reproduction. *Plant. Cell Environ.* 2024, 47, 1592–1605.
- 2) Breygina, M.; Schekaleva, O.; Klimenko, E.; Luneva, O. The Balance between Different ROS on Tobacco Stigma during Flowering and Its Role in Pollen Germination. *Plants* 2022, 11, 993.
- 3) Hiscock, S.J.; Bright, J.; McInnis, S.M.; Desikan, R.; Hancock, J.T. Signaling on the Stigma. Potential New Roles for ROS and NO in Plant Cell Signaling. *Plant Signal. Behav.* 2007, 2, 23–24, doi:10.1111/j.1469-8137.2006.01875.x.
- 4) Zhou, L.-Z.; Dresselhaus, T. Multiple Roles of ROS in Flowering Plant Reproduction. In *Oxidative Stress Response In Plants*; Mittler, R., Van Breusegem, F., Eds.; Academic Press, 2023; Vol. 105, pp. 139–176 ISBN 0065-2296.

Эффективность использования сфагнома в качестве субстрата для вегетативного размножения комнатных растений

Научный руководитель – Белова Татьяна Александровна

Сабельникова Ольга Владимировна

Студент (бакалавр)

Курский государственный университет, Естественно-географический факультет, Курск, Россия

E-mail: olgasabelnickova@yandex.ru

Вегетативное размножение методом черенкования — широко распространённый способ получения посадочного материала в декоративном растениеводстве.

Ключевым этапом черенкования выступает укоренение, эффективность которого напрямую зависит от выбора субстрата. Традиционные субстраты (вода, торф, почвенные смеси, перлит, вермикулит) имеют существенные ограничения — от переувлажнения и развития патогенов до отсутствия питательных веществ [2].

В качестве перспективной альтернативы выступает сфагновый мох (*Sphagnum palustre* L.), обладающий высокой влагоёмкостью, воздухопроницаемостью, антисептическими свойствами и низкой заселённостью патогенами, что делает его оптимальным для чувствительных культур, таких как *Tradescantia albiflora* и *Coleus blumei* [1].

Настоящее исследование посвящено оценке стимулирующего воздействия мха сфагнома (вегетирующего, высушенного, вытяжки) на процессы укоренения и развития декоративных растений (*Tradescantia albiflora* и *Coleus blumei*).

Результаты исследования показали, что субстрат из вегетирующего мха показал наиболее выраженное стимулирующее воздействие: у традесканции длина корней увеличилась в 1,92 раза, а у колеуса — в 2,59 раза относительно контроля; при этом на 6-е сутки прирост длины побегов составил 95%, но к 14-м суткам снизился до 19%. Субстрат, образованный высушенным мхом, продемонстрировал минимальное влияние на корни традесканции (отклонение всего на 2% от контроля), тогда как у колеуса обеспечил умеренный прирост корней (40–77%) и побегов (55% на 6-е сутки, 14% — на 14-е). В сфагновой вытяжке наблюдался сниженный рост корней — у традесканции показатели снизились в диапазоне от 0,41 до 0,82 раз, у колеуса — от 0,39 до 0,72 раз по сравнению с контролем. В то же время по длине побегов результаты в экстракте показали максимальный стимулирующий эффект: на 6-е сутки у колеуса показатели выросли в 2,2 раза, а к 14-м суткам остались наивысшими (1,37 раза относительно контроля).

На основании полученных результатов вегетирующий мох следует признать наиболее эффективным субстратом для комплексного стимулирования роста растений, поскольку он достоверно стимулирует развитие как корневой системы, так и надземной части у обоих исследуемых видов. Высушенный мох может рассматриваться в качестве приемлемой альтернативы: хотя его воздействие менее выражено, он обеспечивает умеренный прирост корней и побегов и демонстрирует стабильность эффекта на разных стадиях развития. Вытяжка из сфагнома, в свою очередь, не подходит на роль универсального субстрата из-за ингибирующего влияния на рост корней, но может быть рекомендована как стимулятор роста побегов — она показала максимальный эффект по данному показателю на ранних сроках и сохранила лидирующие позиции к окончанию эксперимента.

Источники и литература

- 1) Лебедева Е. В. Сфагновые мхи: биология, экология, практическое применение // Ботанический журнал. 2011. № 4. С. 55–632.
- 2) Соколова Т. А. Субстраты для теплиц: свойства и применение. М. : Агропромиздат, 2008. 148 с.

Анализ разнообразия сенсорных гистидинкиназ указывает на значительную модификацию MSP-сигналинга у эволюционно ранних групп наземных растений

Научный руководитель – Ломин Сергей Николаевич

Седельков Алексей Андреевич

Студент (бакалавр)

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Биологический факультет, Кафедра биоорганической химии, Москва, Россия

E-mail: sedleshka@mail.ru

MSP (multistep phosphorelay) – это тип сигналинга у растений и прокариот, который инициируется белками – сенсорными гистидинкиназами. У растений сенсорные гибридные гистидинкиназы при активации запускают каскадную передачу фосфата между гистидином и аспаратом. Сигнал, воспринимаемый рецепторной гистидинкиназой, запускает автофосфорилирование гистидина, после чего фосфат передается на аспарат С-концевого ресиверного домена рецептора. Затем этот «горячий» фосфат передается на гистидин растворимого белка-переносчика фосфотрансмиттера, откуда он затем переходит на аспарат ресиверного домена белка-регулятора ответа. Согласно устоявшимся представлениям, важнейшей ролью MSP у растений является передача сигнала фитогормона цитокинина. У модельного растения арабидопсис рецепторы цитокинина представлены тремя белками АНК2-4 (*Arabidopsis histidine kinase*). Имеются и другие классы сенсорных гистидинкиназ, которые скорее играют дополнительную роль в MSP-сигналинге, включая рецепторы этилена (ETR1), АНК1, СК11, АНК5. Все эти классы белков, кроме АНК5, являются трансмембранными. Таким образом, у покрытосеменных растений имеется пять классов сенсорных гибридных гистидинкиназ, среди которых функционально доминируют рецепторы цитокинина АНК2-4.

В нашей работе мы изучили состав пула сенсорных гибридных гистидинкиназ у разных групп наземных растений. У группы мохообразных к пяти упомянутым имеется еще пять классов сенсорных гистидинкиназ: CHASE1-, MASE1-, HAMР-, PAC(РНК)-, RR-С-классы. Среди них только представители PAC-класса не имеют трансмембранных доменов. В других группах наземных растений эти классы постепенно исчезают по мере продвижения по эволюционному древу по направлению к цветковым растениям. Мы установили, что у мха *Physcomitrium patens* гены представителей дополнительных классов гистидинкиназ во многих случаях активно экспрессируются. Причем их паттерны экспрессии часто пересекаются, что предполагает присутствие в одной клетке нескольких типов гистидинкиназ. Маловероятно, что какие-либо другие гистидинкиназы, кроме цитокининовых, способны к высоко-аффинному связыванию цитокининов. Мы предполагаем, что цитокининовый сигналинг у эволюционно ранних групп наземных растений интегрирован в восприятие других сигналов внешней и внутренней среды. При этом фосфотрансмиттеры у ранних групп наземных растений, в отличие от гистидинкиназ, малочисленны и однотипны. В частности, у *Physcomitrium patens* имеется всего два фосфотрансмиттера. Таким образом, несколько сигналов вероятно объединяются на общих фосфотрансмиттерах, что должно приводить к возникновению общего ответа. Известно, что представители класса PAC(РНК) участвуют в световых реакциях у *Physcomitrium patens*, но их интеграция с цитокининами не изучалась.

**Влияние различных концентраций гуминового препарата н-БоГум на
экспланты картофеля в условиях *in vitro***

Научный руководитель – Мейсурова Александра Фёдоровна

Уловков Илья Александрович

Студент (магистр)

Тверской государственной университет, Тверь, Россия

E-mail: ulovkov2003@gmail.com

Получение качественного посадочного материала картофеля *in vitro* — приоритетная задача. Эффективность микроразмножения зависит от состава питательной среды с гуминовыми препаратами, поэтому оптимизация их концентраций актуальна. Цель работы — изучение влияния различных концентраций гуминового препарата н-БоГум на морфометрические параметры эксплантов картофеля в культуре *in vitro*.

В качестве питательной среды для культивирования использовали агаризованную среду Мурасиге-Скуга, содержащую стандартный набор макро- и микроэлементов, витаминов и сахарозу. Для изучения ростостимулирующего эффекта в среду дополнительно вводили гуминовое удобрение н-БоГум в различных концентрациях.

«н-БоГум» — жидкое гуминовое удобрение на основе торфа, разработанное учеными ВНИИМЗ. Препарат имеет щелочную реакцию (рН 9), содержит гуматы калия (не менее 17 г/л), гуминовые кислоты, макро- и микроэлементы, предназначен для стимуляции роста растений и повышения плодородия почв [1]. Производство экологично, безотходно и экономически выгодно благодаря возможности масштабирования.

Ранее сотрудниками ВНИИМЗ были проведены эксперименты по изучению влияния гуминового удобрения н-БоГум на экспланты картофеля антоциансодержащего сорта Северное сияние в условиях *in vitro*, в ходе которых выявлено его положительное воздействие на ростовые процессы и развитие микрорастений. Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения данного препарата в биотехнологии для оптимизации питательных сред при клональном микроразмножении картофеля. [2] Однако реакция на препарат может быть сортозависимой, поэтому данное исследование посвящено изучению его эффективности на сортах отечественной селекции.

Исследовано 5 вариантов среды: 1 — контроль (без добавления препарата); 2 — с добавлением 0,5 мл/л; 3 — 1,0 мл/л; 4 — 2,0 мл/л; 5 — 4,0 мл/л удобрения. В качестве материнских растений использовали экземпляры сортов картофеля средней спелости Борец и Восторг. Культивирование осуществляли в условиях световой комнаты при 16-часовом фотопериоде, температуре +21 °С и влажности 70%. Учет морфометрических показателей (длина побегов, количество междоузлий, число и длина корней, сухая биомасса) проводили на 45 сутки культивирования.

Установлено, что добавление гуминового удобрения «н-БоГум» в среду Мурасиге-Скуга оказывает сортоспецифичное влияние на морфометрические параметры эксплантов картофеля *in vitro*. Для сорта Борец оптимальной является концентрация 1,0 мл/л, стимулирующая побегообразование: длина побега (9,25 см) и количество междоузлий (9,39 шт.) превысили контроль на 88% и 43% соответственно. Для сорта Восторг наиболее эффективной оказалась концентрация 4,0 мл/л, способствующая развитию корневой системы и накоплению сухой биомассы (длина корня 13,82 см, сухая масса 6,34 мг). Полученные данные подтверждают необходимость дифференцированного подбора концентраций препарата в зависимости от генотипа и могут быть рекомендованы для оптимизации питательных сред на этапах микроразмножения и укоренения.

Источники и литература

- 1) Фомичева, Н. В. Влияние технологических приёмов применения гуминового препарата на продуктивность яровой пшеницы / Н. В. Фомичева, Г. Ю. Рабинович, Ю. Д. Смирнова // Достижения науки и техники АПК. — 2020. — Т. 34, № 9. — С. 53–58. — DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10910.
- 2) Уловков, И. А. Повышение эффективности размножения картофеля *in vitro* с помощью гуминового препарата / И. А. Уловков, Е. А. Подолян ; науч. рук. Л. В. Петухова // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2025».

Применение наночастиц серебра для борьбы с бактериальным ожогом яблони, вызванным *Erwinia amylovora*

Научный руководитель – Крутяков Юрий Андреевич

Хина Александр Григорьевич

Сотрудник

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Химический факультет, Кафедра химии нефти и органического катализа, Москва, Россия

E-mail: khinaag@my.msu.ru

В последние десятилетия проблема бактериозов растений существенно обострилась и стала одной из главных причин потери урожая [1]. Эффективность традиционных методов контроля бактериозов ограничена: бактерициды на основе меди малоэффективны при распространении патогена в апопласте, а применение антибиотиков сдерживается рисками формирования лекарственной устойчивости. Вызывает озабоченность и рост пестицидной нагрузки на полезную микробиоту. Это обуславливает актуальность разработки инновационных и экологичных средств защиты. Представляют интерес наночастицы (НЧ) серебра, сочетающие антибактериальную активность со способностью повышать неспецифическую устойчивость растений к стрессовым факторам [2]. Целью работы являлась оценка биологической эффективности дисперсий функционализированных НЧ серебра для защиты яблони от бактериального ожога, вызванного *Erwinia amylovora*.

Дисперсию НЧ серебра получали восстановлением нитрата серебра боргидридом натрия со стабилизатором амфополикарбоксиглицинатом натрия. Полученные НЧ в основном имели сферическую форму со средним диаметром $10,4 \pm 4,9$ нм.

Биологическую эффективность НЧ серебра изучали на растениях яблони сорта «Россошанское полосатое» в условиях естественного инфекционного фона, характеризующегося высокой степенью развития бактериального ожога. Идентификацию патогена проводили методом ПЦР в реальном времени, подтвердившим наличие ДНК *E. amylovora* в пораженных тканях. Для обоснования концентраций, используемых в полевых опытах, определяли чувствительность выделенного изолята к НЧ серебра *in vitro*; величина МИК составила 18,75 мг/л. Полевые испытания проводили при четырехкратном опрыскивании деревьев дисперсиями НЧ серебра в концентрациях 5 и 25 мг/л с нормой расхода 2 л/дерево. Учитывали распространенность (долю пораженных соцветий и побегов) и степень развития (относительную площадь некроза тканей) болезни.

Установлено, что обработки дисперсией НЧ серебра достоверно снижали пораженность яблони бактериальным ожогом. В контроле распространенность болезни на побегах составила 19,5%, а степень развития болезни - 12,7%. При обработках растений дисперсией НЧ серебра с концентрацией 5 мг/л (ниже МИК) биологическая эффективность составила 52,7%, а при 25 мг/л (выше МИК) - 80,3%. Выявленная концентрационная зависимость подтверждает вклад как прямого антибактериального действия, так и опосредованной активации защитных механизмов растений, включая индукцию неспецифического иммунитета растения при действии НЧ серебра даже в сублетальных для патогена концентрациях. Фитопротекторный эффект также сопровождался прибавкой урожая на 8,7 и 12,1 ц/га для дисперсий с концентрацией 5 и 25 мг/л соответственно.

Источники и литература

- 1) Mansfield, J., Genin, S., Magori, S., et al. Top 10 plant pathogenic bacteria in molecular plant pathology // Mol. Plant. Pathol. Vol. 13. № 6. P. 614-629.

- 2) Tariq, M., Khan, N.M., Ahmed, B., et al. Biological Synthesis of Silver Nanoparticles and Prospects in Plant Disease Management // *Molecules*. Vol. 27. № 15. Article №4754.

Влияют ли условия культивирования на жирнокислотный состав культур растительных клеток?**Научный руководитель – Сидоров Роман Александрович****Янковский Давид Александрович***Студент (магистр)*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Биологический факультет, Кафедра физиологии растений, Москва, Россия

E-mail: davidyankovskiu@gmail.com

Культуры растительных клеток широко применяются для получения различных полезных вторичных метаболитов. Анализ липидного состава коллекций культур интересен как в фундаментальном плане, так и с точки зрения получения липидов, обладающих полезными нутрицевтическими и фармакологическими свойствами. Ранее считалось, что ЖК состав суммарных липидов (ЖКССЛ) культур растительных клеток схож с таковым в листьях [1], однако в ходе скрининга 55 темновых суспензионных культур, предоставленных лабораторией биологии культивируемых клеток ИФР РАН, были установлены различия их ЖКССЛ. Ряд исследованных культур способны накапливать необычные ЖК. Культуры *Polyscias* и *Tribulus* накапливают значительные количества ЖК с очень длинной цепью (ЖКОДЦ), культуры *Dioscorea* — фурановые жирные кислоты, ряд культур *Humulus* — дикарбоновые ЖК (ДЖК). Кроме того, у культуры *Polyscias* впервые была обнаружена необычная ацетиленовая ЖК (18:3Δ^{9,11a,15}). Данные о ЖКССЛ культур были использованы для кластеризации методом *k*-средних. Содержание ненасыщенных ЖК оказалось наиболее важным фактором для выделения кластеров. Было выявлено 4 основных кластера, различавшихся главной(-ыми) ненасыщенной(-ыми) ЖК: (1) 18:2, (2) 18:3, (3) 18:2 и 18:1, (4) 18:2 и 18:3. В два дополнительных кластера выделялись культуры, накапливавшие значительные количества необычных ЖК: *Polyscias*, содержащий до 36% ЖКОДЦ (C₂₀–C₂₆) и *Humulus*, доля ДЖК (C₁₆–C₁₈) в котором достигала 10%. Внутри каждого основного кластера встречались культуры различных систематических групп, полученные из разных эксплантов, выращиваемые на различных питательных средах и подвергающиеся воздействию различных гормонов. Таким образом, эти факторы нельзя считать определяющими ЖКССЛ. Известно, что культуры растительных клеток могут проявлять метаболическую нестабильность, вызванную генетическими перестройками и эпигенетическими изменениями [2]. Тем не менее, если такие изменения затрагивают первичные молекулярные и биохимические процессы, клетка либо погибает, либо активирует компенсаторные механизмы. Близость значений индексов ненасыщенности у основных кластеров может свидетельствовать о том, что, испытывая при культивировании одинаковый механический стресс, клетки адаптируют вязкость мембран, используя разные наборы основных ненасыщенных ЖК в зависимости от той или иной активности их генома.

Источники и литература

- 1) Tattrie N. H., Veliky I. A. Fatty acid composition of lipids in various plant cell cultures // Can. J. Bot. 1973. Т. 51, № 3. С. 513–516.
- 2) Sanchez-Muñoz R. et al. Genomic methylation in plant cell cultures: A barrier to the development of commercial long-term biofactories // Engineering in Life Sciences. 2019. Т. 19, № 12. С. 872–879.