

ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ КАФЕДРЫ КЛЕТОЧНОЙ БИОЛОГИИ И БИОИНЖЕНЕРИИ РАСТЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА БГУ

В. М. ЮРИН¹⁾, А. И. СОКОЛИК¹⁾, Г. Г. ФИЛИПЦОВА¹⁾, В. В. ДЕМИДЧИК¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

Представлены направления и основные результаты научно-исследовательской и учебной работы кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений, охватывающие широкий спектр проблем современной биологии растений, по которым ведутся фундаментальные исследования механизмов функционирования и регуляции физиологических процессов на разных уровнях организации, а также связей растительных организмов с окружающей средой. Установлены характеристики и закономерности регуляции селективных и неселективных ионных каналов плазматической мембраны клеток растений. Изучена модификация ионотранспортных систем плазматической мембраны при некоторых биотических и абиотических воздействиях: атаке грибных патогенов; действии ряда сим-триазиновых гербицидов, триазоловых фунгицидов и пиретроидных инсектицидов. В области биотехнологии получены каллусные и суспензионные культуры ряда лекарственных растений: эхинацеи пурпурной, шалфея лекарственного, сирени обыкновенной, каллизии душистой, пажитника греческого, катарантуса розового, барвинка малого и др. Прикладные работы ведутся по проблеме создания и оптимизации методов клонирования декоративных растений в целях их размножения в промышленных масштабах. Кафедрой клеточной биологии и биоинженерии растений совместно с Республиканским учебно-опытным унитарным предприятием БГУ «Щемяслица» организован Научно-практический центр по микроклональному размножению декоративных растений. Сформированы коллекции клонов декоративных комнатных растений (более 100 видов и гибридов орхидей), декоративных кустарников, древесных декоративно-лиственных и хвойных растений. Одно из важнейших направлений деятельности кафедры – разработка новых учебных курсов и обновление существующих в соответствии с современными мировыми тенденциями развития биологической науки, формирование новых дисциплин, подготовка учебно-методических комплексов, учебников и учебных пособий. Очерчен круг дальнейших научных исследований на кафедре, которые направлены на установление молекулярно-клеточных основ стрессоустойчивости и продуктивности растений, создание эффективных биотехнологий и систем анализа на базе культур клеток, а также разработку и оптимизацию современных методов микроклонального размножения декоративных растений.

Ключевые слова: клеточная биология; физиология растений; биоинженерия и биотехнология растений.

Образец цитирования:

Юрин В. М., Соколик А. И., Филипцова Г. Г., Демидчик В. В. Основные достижения кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета БГУ // Вестн. БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География. 2016. № 3. С. 13–20.

For citation:

Yurin V. M., Sokolik A. I., Filiptsova H. G., Demidchik V. V. Major achievements of the department of plant cell biology and bioengineering. *Vestnik BGU. Ser. 2, Khimiya. Biol. Geogr.* 2016. No. 3. P. 13–20 (in Russ.).

Авторы:

Владимир Михайлович Юрин – доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

Анатолий Иосифович Соколик – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

Галина Григорьевна Филипцова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

Вадим Викторович Демидчик – доктор биологических наук, доцент; заведующий кафедрой клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

Authors:

Vladimir Yurin, doctor of science (biology), full professor; professor at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.

yurin@bsu.by

Anatoliy Sokolik, PhD (biology), docent; associate professor at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.

sokolik@bsu.by

Halina Filiptsova, PhD (biology), docent; associate professor at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.

filiptsova@bsu.by

Vadim Demidchik, doctor of science (biology), docent; head of the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.

demidchik@bsu.by

MAJOR ACHIEVEMENTS OF THE DEPARTMENT OF PLANT CELL BIOLOGY AND BIOENGINEERING

V. M. YURIN^a, A. I. SOKOLIK^a, H. G. FILIPTSOVA^a, V. V. DEMIDCHIK^a

^aBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus

The paper describes the main areas of research and training activities of the department of plant cell biology and bioengineering covering a wide range of problems of modern plant biology. Fundamental research of the mechanisms that work to keep the plants alive and functioning at different organizational levels (molecular, cellular, sub-cellular etc.) are presented here. The development and optimization of ornamental plants cloning methods to its mass reproduction are the main applied research line. The department of plant cell biology and bioengineering together with the UE «Schemyslitsa» had established «Micropropagation of ornamental plants scientific and practical center», had built up collection of clones of a number of decorative indoor plants (more than 100 species and hybrids of orchids), a number of ornamental shrubs, woody flowerless plants and conifers. In its framework, department has outlined its main areas of work, namely: course development and refinement following modern international trends in the development of biological science, creating teaching materials, textbooks and teaching aids. Plan of the following investigations: establishment of molecular bases of cellular stress and plant productivity, creation of new, effective biotechnology and analysis systems based on plant cell cultures, as well as the development and optimization of modern methods of micropropagation of ornamental plants.

Key words: cell biology; plant physiology; plant biotechnology and bioengineering.

На кафедре клеточной биологии и биоинженерии растений активно ведется научно-исследовательская работа, соответствующая приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь. Сфера научных интересов сотрудников кафедры включает разнообразные современные направления. Ведется изучение механизмов функционирования и регуляции физиологических процессов растений на разных уровнях организации: молекулярном, клеточном, субклеточном, организменном, а также связей растительных организмов с окружающей средой.

Основные научные направления работы кафедры:

- установление механизмов транспорта веществ и рецепции на плазматической мембране растительной клетки, закономерностей регуляции данных процессов эндо- и экзогенными физико-химическими факторами, их участие в физиологических и патофизиологических процессах в организме растения;
- развитие новых биотехнологий на основе культур клеток, тканей и органов растений. Установление физиолого-биохимических механизмов жизнедеятельности культур клеток *in vitro*, контролирующих процессы биосинтеза биологически активных веществ;
- развитие биоинженерных подходов в биотехнологии растений: использование техники иммобилизации, наночастиц, фотобиореакторов, генетической модификации в целях стимуляции и контроля метаболических и ростовых процессов;
- анализ влияния на организм растения неблагоприятных факторов среды и ксенобиотиков (патогенов, засоления, засухи, тяжелых металлов, ионизирующей радиации);
- установление генетических и физиологических механизмов окислительного стресса, запрограммированной клеточной гибели и автофагии у высших растений. Моделирование воздействия стресс-факторов на урожайность;
- биотестирование загрязнения окружающей среды на основе ответов клеток растений;
- исследование действия новых классов иммуностимуляторов и адаптогенов растений (фитопростаноиды и элиситоры пептидной природы) на устойчивость сельскохозяйственных культур к стрессовым факторам;
- клонирование декоративных растений в условиях *in vitro* в целях их размножения в промышленных масштабах;
- феномика высших растений. Разработка платформы для феномного анализа древесных растений;
- создание и совершенствование учебно-методических комплексов для преподавания дисциплин, связанных с экспериментальной и прикладной биологией растений, ксенобиологией, системной биологией.

Одним из классических научных направлений, развиваемых на кафедре достаточно давно и не утрачивающих актуальность в настоящее время, является исследование транспортных систем плазматической мембраны растительной клетки. На кафедре сложилась и поддерживается научная школа доктора биологических наук, профессора В. М. Юрина, являющегося мировым классиком в исследованиях клеточных механизмов ионного транспорта у растений. В настоящее время сотрудниками кафедры изучаются механизмы поступления минеральных веществ в растительную клетку на молекулярно-генетическом уровне.

Среди транспортных процессов перенос катионов через мембранные ионные каналы играет ключевую роль, так как примерно половина макроэлементов и большинство микроэлементов представлены в окружающей среде в катионной форме. Понимание механизмов функционирования катионных

каналов важно как в теоретическом, так и в практическом плане. На уровне растения катионные каналы контролируют рост и развитие органов и тканей, водный обмен, дыхание и фотосинтез. Они ответственны за распознавание и усиление эндогенных и экзогенных стимулов, таких как гормоны, ксенобиотики и стрессовые воздействия. Понимание механизмов регуляции катионных каналов исключительно важно для сельского хозяйства и биотехнологии, например для оптимизации и рационального использования минеральных удобрений, устойчивого развития сельского хозяйства, направленной регуляции количества и качества урожая, разработки генно-инженерных подходов повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к фитопатогенам и абиотическим стрессам.

В ходе многолетних исследований В. М. Юрина, А. И. Соколика и В. В. Демидчика установлены механизмы функционирования и закономерности регуляции K^+ -, Ca^{2+} -, Cl^- -ионных и неселективных ионных каналов плазматической мембраны клеток растений. В. В. Демидчиком предложена первая функциональная классификация неселективных катионных каналов (НKK), согласно которой они подразделяются на 7 основных классов: 1) стационарные деполяризационно-активируемые; 2) стационарные гиперполяризационно-активируемые; 3) стационарные потенциалнезависимые; 4) активируемые циклическими нуклеотидами; 5) активируемые аминокислотами; 6) активируемые активными формами кислорода (АФК); 7) активируемые патогенными элиситорами. Показано, что НKK обеспечивают стационарный пассивный транспорт одновалентных и двухвалентных катионов, а также катионные потоки в ответ на генерацию АФК, действие аминокислот и пуринов. Полученные результаты указывают на прямое участие НKK в регуляции минерального обмена, ответе растительной клетки на стрессовые воздействия, росте и развитии растения (рост клетки растяжением), т. е. в процессах, контролирующих урожайность сельскохозяйственных культур и биоразнообразие дикой флоры. Особое значение результаты имеют для развития генно-инженерных подходов в регуляции урожайности и стрессоустойчивости растений.

По проблеме устойчивости растений к биотическим стрессорам изучена модификация ионотранспортных систем плазматической мембраны растительных клеток при атаке грибных патогенов, а также их связь с синтезом защитных соединений и развитием реакции гиперчувствительности. На корнях проростков пшеницы показано, что при действии гриба *Fusarium* усиливается выход ионов калия. Методом «пэтч-кламп» на протопластах из корней пшеницы установлено, что катионные каналы относительно устойчивого к фузариозу сорта активируются в присутствии культуральной жидкости *Fusarium culmorum*, в то время как катионные каналы у чувствительного сорта не изменяют своих характеристик. Очевидно, что способность реагировать на присутствие в среде фитопатогена *Fusarium culmorum* потенциально может лежать в основе устойчивости пшеницы к фузариозам.

При разработке научных основ сравнительной оценки степени индуцированной устойчивости растений пшеницы к корневым гнилям грибной этиологии по реакции плазматических мембран на клетках *Nitella* показаны модификация калиевых каналов тиомочевинной и ее изменение в присутствии фильтрата культуральной жидкости гриба *Fusarium*: тиомочевина снижает эффект фузариума.

Установлено значительное стрессовое воздействие выделений патогенных грибов на ацидофицирующую активность корневой системы проростков пшеницы. В частности, после обработки культуральным фильтратом *Fusarium* наблюдается стимуляция ацидофицирующей активности корней. Препарат Тубелак снимает стимуляцию ацидофикации, вызванную грибом, Туберит оказывает аналогичное действие, но в меньшей степени, а брассиностероид Эпин практически не влияет на исследуемый процесс. Выявленные закономерности вносят существенный вклад в понимание механизмов действия фитопатогенов на растительные клетки и могут служить основой для разработки новых классов биологически активных препаратов в целях повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к биотическим стрессорам.

Обеспечение длительного и безопасного существования живых организмов в условиях глобального техногенного загрязнения возможно лишь при глубоком изучении механизмов биологического действия химических соединений. Поскольку первичной мишенью экзогенных соединений является плазматическая мембрана, на кафедре изучается влияние отдельных классов веществ на ее транспортно-барьерные свойства и функционирование отдельных систем переноса ионов. Выбор соединений определялся хозяйственной направленностью и необходимостью тестирования их экологической безопасности. В частности, использование большого количества пестицидов приводит к их попаданию в биосферу, где живые организмы начинают испытывать на себе пестицидный пресс. Сформировался своеобразный «пестицидный парадокс», суть которого состоит в том, что человечество, применяя пестициды, само становится мишенью их воздействия.

Клеточные мембраны весьма чувствительны ко многим химическим соединениям: одни вещества вызывают прямую модификацию мембранных структур, другие, не влияя непосредственно на мембранные структуры, воздействуют косвенным путем – через нарушение биохимических процессов клетки, ответственных за поддержание нормального функционирования мембран и т. д.

Поскольку первичной мишенью пестицидов является плазматическая мембрана, то представляется целесообразным выявить их влияние на ее транспортные свойства. Установлены особенности действия сим-триазиновых гербицидов (атразин, симазин, прометрин), триазоловых фунгицидов (пропиконазол, тебуконазол, ципроконазол) и цианосодержащих пиретроидных инсектицидов (дельтаметрин, циперметрин, эсфенвалерат) на транспортные характеристики цитоплазматической мембраны клеток растений. Быстрое развитие биоэлектрической реакции растительной клетки на испытанные пестициды говорит об их первичном непосредственном влиянии на плазматическую мембрану. Эта закономерность подтверждается данными о характере потенциалзависимости сдвигов скорости циклоза под действием пестицидов. Триазоловые фунгициды, сим-триазиновые гербициды и цианосодержащие пиретроидные инсектициды характеризуются различной степенью мембранотропной активности, располагаясь в следующие ряды: пропиконазол > тебуконазол > ципроконазол, атразин > симазин > прометрин, эсфенвалерат > дельтаметрин > циперметрин. Анализ приведенных рядов указывает на то, что из гербицидов большей токсичностью для растительной клетки обладают хлорсодержащие сим-триазины (атразин, симазин) по сравнению с тиометилсодержащими (прометрин), среди фунгицидов – дихлорсодержащее соединение (пропиконазол), а для цианосодержащих пиретроидных инсектицидов – эсфенвалерат.

В основе сдвигов биоэлектрических параметров лежат изменения селективности плазматической мембраны к наиболее важным физиологическим ионам (K^+ , Na^+ , Cl^-) под действием пестицидов в концентрации $5 \cdot 10^{-5}$ моль/л и ниже, которые можно связать в первую очередь с индуцируемым ими снижением функциональной активности и катионной избирательностью потенциалзависимых K^+ -каналов. Проявление в микромолярных концентрациях структурно зависимых количественных различий в ингибировании фотоиндуцируемой H^+ -АТФазной помпы плазматической мембраны растительных клеток вплоть до ее полного подавления и разных механизмов действия тестируемых пиретроидов в случае модификации возбудимых кальциевых и Ca^{2+} -зависимых каналов и Cl^- -каналов плазматической мембраны объясняются отличиями в структуре и стереохимии молекул.

Так, показано, что взаимодействие молекул испытанных фунгицидов с плазматической мембраной, преимущественно с ее липидной фазой, обусловлено липофильными свойствами заместителей в положении N-1 триазолового кольца. Для испытанных пиретроидных инсектицидов обнаружена положительная связь между сдвигами электрического потенциала плазматической мембраны и молекулярной рефракцией и поляризуемостью молекул.

Выявленные индуцируемые пестицидами молекулярно-мембранные перестройки транспортных систем плазматической мембраны растительных клеток позволили разработать научную теорию и концепцию в области тестирования биологической активности ксенобиотиков и средств экологического мониторинга.

Последние 20 лет большое внимание на кафедре уделяется изучению вторичного метаболизма в клетках культур растений *in vitro*. Получены стабильно растущие каллусные ткани и клеточные суспензии ряда лекарственных растений: эхинацеи пурпурной, шалфея лекарственного, сирени обыкновенной, каллизии душистой, пажитника греческого, катарантуса розового, барвинка малого и др. Представленные виды характеризуются разнообразием фармакологических эффектов и содержат различающиеся по химической структуре и физико-химическим свойствам группы вторичных метаболитов. Для каждой культуры установлены оптимальные условия культивирования, позволяющие повышать продукцию вторичных метаболитов.

Клетки каллусной культуры *Vinca minor* синтезируют широкий спектр индольных алкалоидов, среди которых по содержанию преобладают дегидровинцин и дегидровинкамаин. В каллусной культуре барвинка малого установлено наличие стриктозида. Показано, что в каллусных культурах *Vinca minor* и *Catharanthus roseus* стриктозида накапливается существенно больше, чем в нативных растениях.

Свет стимулирует активность триптофандекарбоксилазы (ТДК) и повышает содержание триптамина в каллусных тканях *Catharanthus roseus* и *Vinca minor*. Максимальная активность ТДК наблюдается при соотношении «ауксин – цитокинин» 1 : 2 ($0,5 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ индолилуксусная кислота, $1 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ кинетин). Под действием света увеличивается содержание дегидровинкамаина и дегидровинцина в клетках каллусной ткани *Vinca minor* и серпентина – в каллусных тканях *Catharanthus roseus* вне зависимости от концентрации нафтилуксусной кислоты в среде культивирования. Накопление аймалицина в каллусных клетках *Catharanthus roseus* под влиянием света зависит от концентрации нафтилуксусной кислоты в среде инкубации.

Суспензионные культуры клеток *Echinacea purpurea* и *Echinacea pallida* характеризуются хорошо выраженной способностью к синтезу вторичных метаболитов фенольной природы. Доминирующей группой фенольного комплекса обеих суспензионных культур являются гидроксикоричные кислоты и их производные, тогда как флавоноиды относятся к его минорным компонентам. В целях повышения уровней накопления суммы фенольных соединений, а также отдельных их классов в клетках суспензионных культур представителей рода *Echinacea* может быть рекомендовано использование определенных

концентраций салициловой кислоты и метилжасмоната в качестве элиситоров. Экзогенная салициловая кислота в концентрациях 10^{-5} – 10^{-4} моль/л оказывает положительное влияние на продукцию гидроксикоричных кислот клетками суспензионной культуры *Echinacea purpurea* за счет одновременного возрастания уровней накопления указанных вторичных метаболитов и наработки биомассы исследуемой культуры. Увеличение продукции гидроксикоричных кислот клетками суспензионной культуры *Echinacea pallida* в результате использования салициловой кислоты концентрацией 10^{-6} – $5 \cdot 10^{-5}$ моль/л обусловлено главным образом повышением скорости ростовых процессов. Для обеих исследованных суспензионных культур метилжасмонат выступает в роли более эффективного элиситора по сравнению с салициловой кислотой. Для повышения их продукционного потенциала может быть рекомендовано использование метилжасмоната в концентрации 10^{-5} моль/л при переходе культур в фазу замедления роста, т. е. после завершения основных процессов наработки биомассы. Установлено, что увеличение содержания гидроксикоричных кислот в клеточных культурах *Echinacea purpurea* и *Echinacea pallida* в результате обработки исследованными элиситорами коррелирует с повышением активности L-фенилаланинаммиаклиазы.

Впервые получены каллусные культуры листового и стеблевого происхождения пажитника греческого ярового сорта *Ovari 4* и озимого сорта *PSZ.G.SZ*, установлены их морфологические и физиологические характеристики. Проведен качественный и количественный анализ процесса роста и содержания фенольных соединений каллусов пажитника при действии различных факторов среды (свет, экзогенные углеводы, низкотемпературный и солевой стресс). Изучен антиоксидантный потенциал клеточных культур пажитника греческого. Показана положительная корреляция антирадикальной активности каллусов и общего содержания фенольных соединений. На основе каллусной линии листового происхождения получена суспензионная культура, демонстрирующая высокую продуктивность по биомассе и содержанию фенольных соединений с выраженными антиоксидантными свойствами. Результаты исследований существенно дополняют и расширяют имеющиеся представления о процессах регуляции биосинтеза фармакологически активных соединений *in vitro*.

С помощью развиваемых методов (иммобилизация, наночастицы) удалось увеличить эффективность процессов вторичного метаболизма в культурах. Использование иммобилизованных клеток позволило за счет более медленной стационарной фазы роста увеличить наработку биологически активных веществ. Снижение скорости роста клеточной культуры способствует более высокому выходу вторичных метаболитов. Кроме того, иммобилизация клеток в полисахаридных носителях снижает вероятность механического повреждения клеток в ходе культивирования.

Показано, что иммобилизация в кальций-альгинатном геле повышает активность ключевого фермента синтеза индольных алкалоидов ТДК в клетках культур *Catharanthus roseus* и *Vinca minor*. Впервые установлено, что иммобилизация в Ca^{2+} -альгинатном геле клеток суспензионной культуры *Vinca minor* стимулирует синтез и экскрецию винкамина в среду культивирования. Заключение клеток в кальций-альгинат-хитозановый носитель приводит к активации процессов синтеза и экскреции в среду инкубации фенольных соединений, обладающих антирадикальной активностью. При этом инкапсулирование в альгинате натрия низкой вязкости (250 сПз) характеризуется наибольшим стимулирующим влиянием на синтез, накопление и экскрецию триптамина клетками *Catharanthus roseus* и *Vinca minor*.

Низкие уровни наночастиц меди (1 мг/л) способны стимулировать прирост биомассы клеток фотомиксотрофной каллусной культуры *Catharanthus roseus* (L.) G. Don, в то время как макрочастицы меди (балк-частицы) не вызывают подобного эффекта. Начиная с уровня 5 мг/л наночастицы меди стимулируют накопление антоцианов и рост антиоксидантной активности данных культур. Увеличение концентрации как нано-, так и макрочастиц меди в среде культивирования до 25 и 125 мг/л подавляет рост каллуса *Catharanthus roseus*. Результаты работы имеют фундаментальное значение, так как указывают на особый токсико-регуляторный характер взаимодействия наночастиц с каллусной тканью и наличие наноэффекта, отличного от влияния макрочастиц меди.

Одной из важнейших проблем современной биологии является повышение устойчивости растений к неблагоприятным факторам внешней среды. Современный научно обоснованный подход к стратегии защиты растений исходит из того, что экологически наиболее приемлемыми и безопасными являются методы с использованием природных либо моделирующих их регуляторов физиологических процессов, активирующих собственные защитные системы растительного организма. Вещества, проявляющие элиситорные свойства, применяются в низких концентрациях. Они не загрязняют окружающую среду, не обладают биоцидным действием, нетоксичны, безопасны для человека и животных. Относительно небольшая стоимость и очень низкие нормы расхода делают их применение экологически и экономически выгодным.

На кафедре проводится исследование биологической активности новых классов элиситоров, таких как простаноиды – производные ненасыщенных жирных кислот – и пептидные элиситоры GmPer890 и GmPer914, синтезированные в Институте биоорганической химии НАН Беларуси. Установлено, что синтетические простаноиды проявляют биологическую активность в концентрациях 10^{-6} – 10^{-7} моль/л, что сравнимо с содержанием этих соединений в растениях. Выявлены простаноиды ЛЕ1Г, ЛЕ5Г и ЛЕ8К,

оказывающие стимулирующее воздействие на скорость прорастания и всхожесть семян, а также морфометрические характеристики проростков тритикале и гороха. Установленные эффекты обусловлены гиббереллин-подобной активностью данных соединений.

Показано, что некоторые из проанализированных синтетических простаноидов (ДМ-3С и ЛЕ11К) оказывают защитное действие на проростки сельскохозяйственных культур, подвергнутых гипо- и гипертермии. Данные соединения вызывают индукцию антистрессовых механизмов, в результате чего снижается уровень первичных продуктов перекисного окисления липидов в проростках при действии стрессовых факторов. Простаноиды вызывают повышение активности пероксидазы, что свидетельствует о росте неспецифической устойчивости растений к действию стрессоров.

Синтетические олигопептиды GmPep890 и GmPep914 проявляют элиситорное действие в концентрациях 10^{-10} – 10^{-12} моль/л. Они обуславливают увеличение содержания растворимых фенольных соединений и показателя антиоксидантной активности в листьях сои и гороха, что связано с индукцией сигнальных систем. Выявлено, что пептидные элиситоры вызывают запуск механизмов антиоксидантной защиты, в результате чего происходит снижение уровня АФК и, как следствие, скорости окислительных процессов в растениях в условиях действия стрессовых факторов. Разработаны композиции на основе пептидных элиситоров GmPep890 и GmPep914 в сочетании с глутаминовой или янтарной кислотой, повышающие устойчивость сельскохозяйственных культур к действию оксидативного стресса и гипертермии.

Под руководством В. В. Демидчика ведется работа по проблеме воздействия экзогенного Ca^{2+} на модификацию плазматической мембраны клеток корня при стрессе в целях разработки новых средств повышения стрессоустойчивости высших растений. Установлены изменения в процессах окисления липидов плазматической мембраны, вызываемого гидроксильными радикалами, под действием Ca^{2+} , а также при имитации засоления. Показано, что Ca^{2+} не влияет на окисление фосфатидилхолина, в то время как высокие уровни NaCl затормаживают этот процесс. Анализ изменения липидного состава плазматических мембран при помощи MALDI TOF и LC-MS продемонстрировал, что Ca^{2+} модифицирует ответ липида на гидроксильные радикалы. В частности, наблюдается уменьшение количества окисленных и лизоформ липидов, а также ослабление окисления фосфатидилсерина.

В связи с неуклонным увеличением техногенного и антропогенного воздействия на живую природу особую актуальность имеют работы по экофизиологии. Простое феноменологическое описание взаимоотношений между различными живыми системами и окружающей средой не позволяет в полной мере оценить существующую угрозу и спрогнозировать последствия этого воздействия. С каждым годом становится все более очевидной необходимость выявления и описания закономерностей этих взаимоотношений на уровне физиолого-биохимических и молекулярных механизмов, происходящих в живых системах, в частности в растительных организмах.

На кафедре ведутся научно-исследовательские работы, направленные на решение ряда экофизиологических проблем. Среди них – изучение токсичности сточных и природных вод с помощью отдельных клеток водорослей *Nitella flexilis*. Сотрудниками кафедры создано устройство «Биотест», позволяющее проводить непрерывный экспрессный мониторинг качества окружающей среды на основе электроаллогического метода.

Еще одним важным направлением является исследование механизмов поступления и накопления радионуклидов и тяжелых металлов в сельскохозяйственных культурах. Эти задачи решаются путем выявления закономерностей накопления в растениях тяжелых металлов и радионуклидов при внесении биоугля в почву. Изучено влияние добавки биоугля (50 г/кг почвы) к суглинистой почве на параметры накопления кадмия и свинца (Cd и Pb) в растениях пшеницы при 30 сут выращивания. Установлено, что внесение биоугля увеличивает биомассу растений на 15–20 % для надземной части и до 50 % – для корней, а также на 20–30 % снижает накопление Cd в корнях и надземной части и не влияет на аналогичные показатели для Pb. По-видимому, эффект биоугля не вызван просто адсорбцией ионов тяжелых металлов. Подкисление среды до pH 5,5 увеличивает накопление и ускоряет вход Cd в корни как пшеницы, так и гороха.

Параметры накопления ^{109}Cd в корнях пшеницы существенно превышают таковые для ^{90}Sr , несмотря на химическое сходство ионов. Ингибиторный анализ с применением блокаторов катионных каналов Gd^{3+} и верапамила показал существенно большее возрастание и ускорение накопления ^{109}Cd по сравнению с ^{90}Sr при аппликации Gd^{3+} . Можно предположить, что ^{109}Cd и ^{90}Sr входят в корень с помощью различных механизмов, причем для ^{109}Cd доля катионных каналов существенно меньше, чем для ^{90}Sr .

В результате установлено, что биоуголь при внесении в почву проявляет мелиоративное действие, увеличивая биомассу растений, снижая накопление тяжелых металлов, в частности кадмия. Особенно сильно этот эффект выражен для почв с невысокой обменной емкостью (супесь) и практически отсутствует на почвах с высоким содержанием органического вещества (торфяные). Для свинца и стронция при оптимальной влажности почвы мелиоративное действие биоугля невелико и возрастает при снижении влагосодержания почвы. Практический вывод состоит в том, что захоронение биоугля в почве до 5 % ее объема вызывает либо мелиоративное действие, либо по меньшей мере не вредит растениям.

Прикладные работы ведутся по вопросам разработки и оптимизации методов клонирования декоративных растений в условиях *in vitro* в целях их размножения в промышленных масштабах. Совместно с Республиканским учебно-опытным унитарным предприятием БГУ «Щемяслица» создан Научно-практический центр по микроклональному размножению декоративных растений. В рамках работы данного центра сформированы коллекции клонов ряда декоративных комнатных растений (более 100 видов и гибридов орхидей), кустарников (барбарис Тунберга, боярышник колючий, кизильник блестящий, форзиция средняя), древесных декоративно-лиственных и хвойных растений (клен остролистный, можжевельник скальный, туя западная, ель обыкновенная, ель колючая).

С использованием новых классов регуляторов роста растений разрабатываются методы ускоренного вегетативного размножения этих растений в условиях озеленительного хозяйства. Установлено, что жизнеспособность и укореняемость эксплантов ели колючей возрастают при обработке ауксинами в сочетании с диспергированными в водной среде наночастицами серебра, оксида титана и оксида железа. Значительное стимулирующее воздействие также оказывала обработка антиоксидантами и брассиностероидами. Среди протестированных веществ 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота, индолил-3-уксусная кислота, 3-индолилмасляная кислота, 1-нафталинуксусная кислота, эпибрасинолид и наночастицы серебра обладали наиболее значительной корнестимулирующей активностью. На основе полученных данных разработан протокол, а также два лабораторных регламента: на метод использования комбинаций фитогормонов и биоцидов при клональном размножении ели колючей *in vivo* и на метод ускоренного вегетативного размножения ели колючей в нестерильных условиях.

Одно из важнейших направлений деятельности кафедры – разработка новых методик преподавания физиологии и биохимии растений, клеточной биологии и биотехнологии. В рамках данного направления сотрудники кафедры ведут активную работу по обновлению читаемых курсов лекций, соответствующих современным мировым тенденциям развития биологической науки, а также по разработке и внедрению новых дисциплин, созданию учебно-методических комплексов и пособий.

За последние 5 лет были разработаны и внедрены в учебный процесс следующие дисциплины: «Введение в системную биологию» (кандидат биологических наук, доцент А. И. Соколик), «Генно-инженерные и белковые технологии в физиологии растений и сельском хозяйстве» (доктор биологических наук В. В. Демидчик), «Рост, развитие и основы биотехнологии растений» (кандидат биологических наук, доцент Т. И. Дитченко), «Системная биофизика растительной клетки» (кандидат биологических наук, доцент А. П. Кудряшов), «Клеточно-молекулярные механизмы регуляции продуктивности растений» (кандидат биологических наук, доцент И. И. Смолич), «Устойчивые агротехнологии и фитодизайн» (кандидат биологических наук, доцент О. Г. Яковец).

Издан ряд учебных и учебно-методических пособий.

Юрин В. М. Ксенобиология : учебник. Минск : БГУ, 2015. 247 с. (Классическое университетское издание. *С грифом Министерства образования Республики Беларусь*).

Юрин В. М., Яковец О. Г., Дитченко Т. И. Ксеноэкология [Электронный ресурс] : пособие. Минск : БГУ, 2015 (*с грифом Учебно-методического объединения*).

Ксенобиология : метод. рекомендации к лаборатор. занятиям для студентов биол. фак. / В. М. Юрин [и др.]. Минск : БГУ, 2015. 29 с.

Минеральное питание, физиология стресса и адаптации растений : метод. рекомендации к лаборатор. занятиям по курсу «Физиология растений» / В. М. Юрин [и др.]. Минск : БГУ, 2014. 103 с. (*с грифом Учебно-методического объединения*).

Водный режим и дыхание растений : метод. указания к лаборатор. занятиям / А. П. Кудряшов [и др.]. Минск : БГУ, 2013. 45 с.

Юрин В. М., Яковец О. Г., Дитченко Т. И. Ксеноэкология : метод. рекомендации к лаборатор. занятиям, задания для самостоятельной работы и контроля знаний студентов : в 2 ч. Минск : БГУ, 2012. Ч. 1. 54 с. Ч. 2. 42 с.

Кудряшов А. П., Филипцова Г. Г., Смолич И. И. Учебная биотехнологическая практика : метод. рекомендации к лаборатор. занятиям. Минск : БГУ, 2012. 20 с.

Кафедра клеточной биологии и биоинженерии растений имеет тесные научные связи с Центральным ботаническим садом НАН Беларуси, Институтом биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси, Институтом экспериментальной ботаники НАН Беларуси (заключены соответствующие договоры о сотрудничестве). Для повышения эффективности научно-исследовательской и преподавательской деятельности в 2013 г. основан филиал кафедры в Центральном ботаническом саду НАН Беларуси.

Тесные контакты связывают кафедру с ведущими зарубежными научными центрами, ее сотрудники участвуют в выполнении крупных международных проектов.

В проекте Евросоюза «Plant DNA tolerance» партнерами кафедры являются научные учреждения Великобритании, Германии, Словакии, Чехии, Украины и России. К настоящему времени в рамках этого

проекта установлены закономерности воздействия важнейших стресс-факторов на растения арабидопсиса и пшеницы на фоне различных доз гамма-облучения.

Кроме того, на кафедре начаты работы по гранту Российского научного фонда для ведущих иностранных ученых «Стресс и автофагия у растений: регуляторная роль цитоплазматического калия и активных форм кислорода». Проведены измерения кривых выхода ионов радиоактивного изотопа ^{86}Rb из корней растений арабидопсиса, отличающихся экспрессией и функциональной активностью калиевых каналов.

Результаты научно-исследовательской работы сотрудников кафедры отражены в ряде зарубежных статей с высоким импакт-фактором.

Sosan A., Svistunenko D., Straltsova D., Tsiurkina K., Smolich I., Lawson T., Subramaniam S., Golovko V., Anderson D., Sokolik A., Colbeck I., Demidchik V. Engineered silver nanoparticles are sensed at the plasma membrane and dramatically modify the physiology of *Arabidopsis thaliana* plants // Plant J. 2016. Vol. 85, issue 2. P. 245–257.

Malachowska-Ugarte M., Sperduto C., Ermolovich Y. V., Sauchuk A. L., Jurášek M., Litvinovskaya R. P., Straltsova D., Smolich I., Zhabinskii V. N., Drašar P., Demidchik V., Khripach V. A. Brassinosteroid-BODIPY conjugates: Design, synthesis, and properties // Steroids. 2015. Vol. 102. P. 53–59.

Straltsova D., Chykun P., Subramaniam S., Sosan A., Kolbanov D., Sokolik A., Demidchik V. Cation channels are involved in brassinosteroid signalling in higher plants // Steroids. 2015. Vol. 97. P. 98–106.

Demidchik V. Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology // Environmental Experimental Botany. 2015. Vol. 109. P. 212–228.

Demidchik V., Straltsova D., Medvedev S., Pozhvanov G., Sokolik A., Yurin V. Stress-induced electrolyte leakage: the role of K^+ -permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment // J. Experimental Botany. 2014. Vol. 65. P. 1259–1270.

Demidchik V. Mechanisms and physiological roles of K^+ efflux from root cells // J. Plant Physiol. 2014. Vol. 171, issue 9. P. 696–707.

Molchan O., Romashko S., Yurin V. L-tryptophan decarboxylase activity and tryptamine accumulation in callus cultures of *Vinca minor* L. // Plant. Cell. Tiss. Organ. Cult. 2012. Vol. 108. P. 535–539.

Lohvina H. O., Makai S., Ditchenko T. I., Reshetnikov V. N., Spiridovich E. V., Yurin V. M. Induction of callus from leaves and stems of *Trigonella foenum-graecum* varieties // Acta Agr. Óváriensis. 2012. Vol. 54 (2). P. 29–37.

Kisnieriene V., Ditchenko T. I., Kudryashov A. P., Sakalauskas V., Yurin V. M., Ruksenas O. The effect of acetylcholine on Characeae K^+ channels at rest and during action potential generation // Cent. Eur. J. Biol. 2012. Vol. 7, issue 6. P. 1066–1075.

В последние годы сотрудниками кафедры изданы следующие монографии.

Demidchik V. Reactive oxygen species and their role in plant oxidative stress // Shabala S. Plant Stress Physiology. Wallingford : CAB International, 2016.

Юрин В. М. Имобилизованные клетки лекарственных растений. Саарбрюккен : LAP LAMBERT Academic Publishing, Omni Scriptum GmbH & Co. KG, 2014. 130 с.

Демидчик В. В. Неселективные катионные каналы плазматической мембраны клеток корня высших растений. Минск : БГУ, 2014. 225 с.

Таким образом, на кафедре клеточной биологии и биоинженерии растений создана необходимая материальная база и имеется достаточный интеллектуальный потенциал для развития многих современных научных направлений, имеющих как фундаментальное, так и прикладное значение.

Планируется, что дальнейшие научные исследования на кафедре будут связаны в первую очередь с установлением молекулярно-клеточных основ стрессоустойчивости и продуктивности растений, созданием новых эффективных биотехнологий и систем анализа на основе культур клеток растений, а также разработкой и оптимизацией современных методов микроклонального размножения декоративных растений.

Одной из первоочередных задач является раскрытие первичных механизмов рецепции и усиления стрессовых и гормонально-регуляторных сигналов на плазматической мембране растительной клетки в связи с их функцией в запуске иммунных реакций, стресс-адаптации и кодировании программ развития растительного организма. Будут определены генетические и клеточные детерминанты регуляции интенсивности потоков макро- и микроэлементов минерального питания растений в целях контроля и программирования урожайности важных для сельского хозяйства Беларуси культурных растений.

На кафедре планируется дальнейшее развитие научно-практической базы для оптимизации стерильных клеточных культур растений, синтезирующих биологически активные вещества, а также разработка высокоэффективных биоинженерных технологий в целях получения эксплантов ценных сортов декоративных растений. Будет осуществлена генерация культур клеток ряда лекарственных и пряно-ароматических растений, продуцирующих экономически значимые биологически активные вещества, необходимые для фармацевтической, пищевой и парфюмерно-косметической промышленности Беларуси.

Статья поступила в редколлегию 22.06.2016.

Received by editorial board 22.06.2016.