

Адаптация *Arabidopsis thaliana* к повышенным дозам УФ-В излучения: роль сигнальных путей и световых рецепторов

А.А. Абрамова^{1*}, М.В. Верещагин¹, П.П. Пашковский¹, Вл.Д. Креславский²

¹ Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук, Москва, Россия

² Институт фундаментальных проблем биологии Российской академии наук, Пушкино, МО, Россия

* ann.kiedis2000@gmail.com

Цель: Изучение роли ключевых регуляторных белков *HY5*, *SPA* и *BIC1,2* в механизмах адаптации *Arabidopsis thaliana* к УФ-В-стрессу. Основное внимание уделялось их роли в активации фотозащитных реакций, изменению фотосинтетической активности, устьичной проводимости и биосинтеза флавоноидов через сигнальный путь *UVR8* и взаимодействие с криптохромами.

Материалы и методы: Объект исследования: модельное растение *A. thaliana* (дикий тип и мутанты, дефицитные по генам *HY5*, *SPA*, *BIC1,2*). Экспериментальные условия: воздействие УФ-В излучения (311 нм) в контролируемых условиях. Измерение фотосинтетической активности (параметры $Y(II)$, F_v/F_m) и нефотохимического тушения флуоресценции (NPQ) с помощью mini-PAM II. А также устьичной проводимости, скорости фотосинтеза и транспирации с помощью Ciras 3. Оценка экспрессии генов, связанных с антиоксидантной защитой и биосинтезом флавоноидов. Исследование взаимодействия белков *HY5*, *SPA* и *BIC1,2* с *UVR8* и криптохромами с использованием методов молекулярной биологии. Анализ уровня антоцианов и фотосинтетических пигментов спектрометрически.

Статистическую обработку данных проводили с использованием стандартных статистических методов для оценки достоверности результатов.

Результаты: Исследование показало, что белок *HY5*, активируемый *UVR8*, играет ключевую роль в адаптации *A. thaliana* к УФ-В-стрессу. *HY5* индуцирует экспрессию генов, отвечающих за биосинтез флавоноидов (например, *CHS*), что способствует защите клеток от повреждений, вызванных УФ-В излучением. Кроме того, *HY5* регулирует работу фотосистемы II, поддерживая баланс между поглощением и рассеиванием световой энергии, что подтверждается изменениями параметров $Y(II)$ и F_v/F_m . Белок *SPA*, взаимодействуя с комплексом *COP1*, стабилизирует *HY5*, предотвращая его деградацию. Это способствует активации фотозащитных механизмов и накоплению антиоксидантов, что снижает окислительный стресс у растений. Белки *BIC1,2* играют важную роль в регуляции взаимодействия между *UVR8* и криптохромами. У нокаут-мутантов *bic1,2* нарушение этого взаимодействия приводит к гиперактивации *UVR8*-зависимых сигнальных путей. Это сопровождается усилением экспрессии генов антиоксидантной защиты (*APX*, *GPX*) и увеличением синтеза флавоноидов. Одновременно наблюдается повышение нефотохимического тушения флуоресценции (NPQ), что защищает фотосистему II от повреждений, вызванных избыточным светом. У мутантов *hy5* отмечается резкое снижение фотосинтетической активности и недостаточная активация NPQ, что делает их более чувствительными к УФ-В-стрессу. У *spr*-мутантов, несмотря на повышенный уровень флавоноидов, нарушение водного обмена и устьичной регуляции ухудшает их способность адаптироваться к стрессовым условиям. Таким образом, баланс между активацией фотозащитных механизмов и поддержанием фотосинтеза является критически важным для устойчивости растений к УФ-В.

Выводы: Проведенное исследование демонстрирует, что белки *HY5*, *SPA* и *BIC1,2* играют ключевую роль в адаптации *A. thaliana* к УФ-В-стрессу, координируя фотозащитные механизмы через сигнальный путь *UVR8* и взаимодействие с криптохромами. *HY5*, как основной транскрипционный регулятор, активирует экспрессию генов, отвечающих за биосинтез флавоноидов, и регулирует работу фотосистемы II, поддерживая баланс между поглощением и рассеиванием световой энергии. *SPA* стабилизирует *HY5*, предотвращая его деградацию, что способствует активации фотозащитных механизмов и накоплению антиоксидантов. Белки *BIC1,2* регулируют взаимодействие между *UVR8* и криптохромами, обеспечивая тонкую настройку световых сигнальных путей. Нарушение работы этих белков у мутантов приводит к значительным изменениям в адаптивных реакциях растений. У мутантов *hy5* наблюдается снижение фотосинтетической активности и недостаточная активация NPQ, что повышает их чувствительность к УФ-В. У *spr*-мутантов, несмотря на повышенный уровень флавоноидов, нарушение водного обмена ухудшает адаптацию к стрессу. У мутантов *bic1,2* гиперактивация *UVR8*-зависимых путей усиливает экспрессию генов антиоксидантной защиты и синтез флавоноидов, но также повышает риск дисбаланса в работе фотосистемы II.

Полученные данные подчеркивают важность баланса между активацией фотозащитных механизмов и поддержанием фотосинтеза для устойчивости растений к УФ-В. Эти результаты открывают перспективы для разработки стратегий генетической модификации сельскохозяйственных культур, направленных на повышение их устойчивости к УФ-В-стрессу. Это особенно актуально в условиях глобальных климатических изменений, когда растения сталкиваются с повышенным уровнем УФ-излучения.

Финансирование: Исследование поддержано грантом Российского научного фонда, проект № 23-14-00266.