УДК 573.6.086.83+577.21 DOI: 10.14258/pbssm.2026045

Влияние актиномицетов *Streptomyces griseoviridis* на устойчивость растений к засухе: экспериментальное исследование

Effect of actinomycete *Streptomyces griseoviridis* on plant drought tolerance: an experimental study

Едренкин В. А., Ермолаева В. А., Павлов А. С., Халитова Э. Х.

Edrenkin V. A., Ermolaeva V. A., Pavlov A. S., Khalitova E. Kh.

ФГБОУ ВО БГПУ им. М. Акмуллы, г. Уфа, Россия
Email: edrenkin333@gmail.com, vika.ermolaeva.18@mail.ru, not-zero@mail.ru, elza817@mail.ru
Akmulla Bashkir State Pedagogical University, Ufa, Russia

Реферат. Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска экологически безопасных подходов к повышению стрессоустойчивости сельскохозяйственных культур. В качестве перспективного агента рассмотрены актиномицеты *Streptomyces griseoviridis*. В ходе исследования получен мутантный клон, устойчивый к условиям засухи *in vitro*, и оценено его влияние на рост растений пшеницы (*Triticum aestivum*) в климатической камере. Проведено секвенирование гена *CarD*, участвующего в регуляции транскрипции рибосомальных генов и связывающего метаболические процессы с адаптацией к стрессу. Показано, что мутация приводит к изменению нуклеотидного состава и структуры гена, а также повышает биостимулирующую активность штамма в условиях высоких температур и дефицита влаги.

Ключевые слова. Актиномицеты, абиотический стресс, ген *CarD,* засуха, ростостимуляция.

Summary. The relevance of this study stems from the need to find environmentally friendly approaches to increasing the stress tolerance of agricultural crops. The actinomycete *Streptomyces griseoviridis* is considered as a promising agent. The study yielded a mutant clone resistant to drought conditions in vitro, and its effect on wheat plant (*Triticum aestivum*) growth in a climate chamber was assessed. The *CarD* gene, which is involved in the regulation of ribosomal gene transcription and links metabolic processes with stress adaptation, was sequenced. It was shown that the mutation alters the nucleotide composition and structure of the gene and increases the strain's biostimulating activity under high temperatures and moisture deficits.

Key words. Actinomycetes, abiotic stress, drought, growth stimulation, *CarD* gene.

Введение. Значительная часть сельскохозяйственных территорий России относится к зоне рискованного земледелия, где растения регулярно подвергаются воздействию экстремальных температур, дефицита влаги, засоления и других стрессовых факторов (Федулов и др., 2015). Как биотические, так и абиотические стрессоры существенно снижают урожайность культурных растений (Farooq et al., 2009; Национальный доклад «Глобальный климат…», 2021; Razi, Muneer, 2021; Guizani et al., 2023).

Применение биопрепаратов на основе микроорганизмов рассматривается как перспективная альтернатива химическим средствам защиты и стимуляции роста. Несмотря на относительную дешевизну синтетических агентов (Соляников, 2018; Ли и др., 2023), их широкое использование сопряжено с экологическими рисками, включая загрязнение пищевых цепей и негативное воздействие на здоровье человека (Zhou et al., 2025). По данным FAO, до 40 % мирового урожая ежегодно теряется из-за вредителей (Gula, 2023), при этом растет устойчивость фитопатогенов к синтетическим пестицидам (Siddiqui et al., 2023). Кроме того, регистрируется высокий уровень острых отравлений пестицидами среди населения (van der Kolk, 2024). В связи с этим возрастает потребность в разработке биологически совместимых средств защиты растений.

Среди микроорганизмов, пригодных для создания многофункциональных биопрепаратов, особое место занимают актиномицеты. Это грамположительные бактерии, образующие ветвящийся мицелий и характеризующиеся высоким содержанием пар гуанин–цитозин в геноме (57–75 %). Они ши-

роко распространены в почвенных экосистемах и играют ключевую роль в круговороте веществ (Bhatti et al., 2017; Das et al., 2008). Представители рода *Streptomyces* известны способностью продуцировать биоактивные соединения, стимулирующие рост растений и подавляющие фитопатогены (Халитова, Галиев, 2025).

Цель настоящей работы – оценить биостимулирующий потенциал мутантного клона *Streptomyces griseoviridis*, полученного в условиях засухи, и выявить молекулярные изменения в гене *CarD*, связанные с адаптацией к стрессу.

Материалы и методы.

Объекты исследования

Исходная культура *Streptomyces griseoviridis* получена из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (ВКПМ). Выращивание проводили на крахмально-казеиновой среде с добавлением 5 % раствора рифампицина для индукции мутагенеза. Отбор устойчивых клонов осуществляли на агаризованной среде с последующим культивированием при 28 и 42 °С для получения рабочей суспензии.

Биотестирование

Семена пшеницы (*Triticum aestivum*) стерилизовали 96 % этанолом в течение 3 минут, троекратно отмывали дистиллированной водой. Экспериментальную группу инокулировали 10-суточной культурой *Streptomyces griseoviridis*, выращенной при 42°С; контроль обрабатывали стерильной водой. Оценку ростостимулирующего эффекта проводили в трех повторностях (по 300 семян в группе). Для исключения выбросов использовали критерий Шовене.

Молекулярно-генетический анализ

Секвенирование гена *CarD* выполнено для исходного и мутантного штаммов. Амплификацию проводили с использованием праймеров:

St.g_forward *ATGACGTTCAAGGTTGGCG* St.g_Rev *TCCACGAGCGGAGGACT*

Анализ нуклеотидных последовательностей выполняли с помощью программного обеспечения Chromas Technelysium DNA Sequencing Software с последующим экспортом в формат FASTA.

Результаты и обсуждение. В ходе скрининга получены два мутантных клона – *Streptomyces griseoviridis_1.23* и *Streptomyces griseoviridis_2.32*. Их фитоактивность оценивали по способности восстанавливать всхожесть семян пшеницы в условиях летального стресса (42 °С, 25 % влажность), при котором необработанный контроль показал 0 % прорастания.

Инокуляция семян мутантными штаммами обеспечила всхожесть на уровне 25 %. У проростков опытной группы отмечены выраженные морфологические изменения корневой системы: сформировался стержневой корень, что нетипично для злаков с мочковатой корневой системой. Это свидетельствует о качественном изменении фитоактивности после мутагенеза.

Сравнительный анализ двух клонов показал, что штамм *Streptomyces griseoviridis_1.23* превосходит *S. griseoviridis_2.32* по стимуляции роста: прирост надземной части составил 5,20 %, подземной – 33,22 %. Таким образом, клон *1.23* был отобран как наиболее перспективный.

Секвенирование гена *CarD* выявило значительные различия между исходным и мутантным штаммами. Длина гена у мутанта составила 568 п.н. против 483 п.н. у оригинала. *GC*-состав увеличился с 51,4 % до 64,3 %, а *AT*-состав снизился с 48,6 % до 35,7 %. В последовательности исходного штамма обнаружены протяженные поли-*A* и поли-*T* участки, повторы *AGAG*, *GGGG*, *GAGA*, а также неканонический стартовый кодон *AGT*. У мутанта выявлен канонический старт-кодон *ATG*, длинная открытая рамка считывания и отсутствие простых повторов.

С помощью метода скользящего окна и поиска консервативных мотивов установлены участки гомологии: центральная область (20 нуклеотидов, идентичность 95,2 %); 3'-концевая гомология с заменой *A→G* в последнем положении; короткие мотивы *GAGAGG* (3 повтора у оригинала, 4 – у мутанта), *CTCCGA*, *ACGACA*.

Полученные данные подтверждают, что ген *CarD*, участвующий в регуляции транскрипции рРНК и синтезе антибиотиков у актиномицетов, претерпел структурные изменения, которые, вероятно, способствовали повышению устойчивости к высоким температурам и усилению взаимодействия с ризосферой. Эксперимент *in vitro* показал, что инокуляция мутантным штаммом изменяет тип корневой системы у пшеницы, что может свидетельствовать о глубоком физиологическом воздействии. Для подтверждения этих эффектов в естественных условиях запланированы полевые исследования *in vivo* на засоленных почвах и при повышенных температурах.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует эффективность использования актинобактерий *Streptomyces griseoviridis* для стимуляции роста и защиты растений в условиях засухи. Мутантный клон *S. griseoviridis_1.23* обладает выраженными ростостимулирующими свойствами, что подтверждено морфометрическими и молекулярно-генетическими данными. Применение таких биопрепаратов позволяет снизить потери урожая от абиотических стрессоров, уменьшить пестицидную нагрузку и перейти к более экологичным технологиям в земледелии.

ЛИТЕРАТУРА

Ли С., Банецкая Е. В., Цзян Ю., Ми Г., Вэй Ж. Влияние длительного применения различных удобрений на популяции микроорганизмов и ферментативную активность почвы // Агронаука, 2023. – Т. 1 (1). – С. 134–141.

Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптивные меры (сельское и лесное хозяйство)» (под редакцией Р. С.-Х. Эдельгериева). – Т. 3. – М.: ООО «Издательство МБА», 2021. – 700 с.

Соляников А. В. Микроорганизмы в почве // Молодой ученый, 2018. – Т. 50 (236). – С. 75–77. URL: https://moluch.ru/archive/236/54777/.

Федулов Ю. П., Котляров В. В., Доценко К. А. Устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды: учеб. пособие. – Краснодар: КубГАУ. 2015. – 64 с.

Халитова Э. Х., Галиев А. Ф. Перспективы применения актиномицетов для повышения стрессоустойчивости растений // Биотехнология, 2025. – Т. 41 (5). – С. 6–12. https://doi.org/10.56304/S0234275825050059

Bhatti A. A., Haq S, Bhat R. A. Actinomycetes benefaction role in soil and plant health // Microb. Pathog., 2017. – Vol. 111. – P. 458–467. https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.09.036

Das S., Lyla P. S., Khan S. A. Distribution and generic composition of culturable marine Actinomycetes from the sediments of Indian continental slope of Bay of Bengal // Chin. J. Oceanol. Limnol., 2008. – Vol. 26. – P. 166–177. https://doi.org/10.1007/s00343-008-0166-5

Farooq M., Wahid A., Kobayashi N. et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management // Agron. Sustain. Dev., 2009. – Vol. 29. – P. 185–212. https://doi.org/10.1051/agro:2008021

Guizani A., Askri H., Amenta M. L., et al. Drought responsiveness in six wheat genotypes: identification of stress resistance indicators // Front. Plant Sci., 2023. – Vol. 14. – P. 1232583. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1232583

Gula L. T. Researchers helping protect crops from pests https://www.nifa.usda.gov/about-nifa/blogs/researchers-helping-protect-crops-pests (The Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023).

Razi K., Muneer S. Drought stress-induced physiological mechanisms, signaling pathways and molecular response of chloroplasts in common vegetable crops // Crit. Rev. Biotechnol., 2021. – Vol. 41. – P. 669–691. https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1874280

Van der Kolk J. Strategic approach to international chemicals management (SAICM). // Encyclopedia of Toxicology (Fourth Edition), 2024. – Vol. 8. – P. 737–740. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00606-0

Siddiqui J. A., Fan R., Naz H. et al. Insights into insecticide-resistance mechanisms in invasive species: challenges and control strategies // Front Physiol. 2023. – Vol. 13. – P. 1112278. https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1112278

Zhou W, Li M, Achal V. A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage // Emerging Contaminants, 2025. – Vol. 11 (1). – 100410.