

МИКРОБИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 579.64

EDN: TEAPFN

doi: 10.17072/1994-9952-2025-4-396-405



Влияние бактерии *Salinicola socius* SMB35^T на рост озимого рапса при низкой положительной температуре

Людмила Николаевна Ананьина^{1✉}, Елена Анатольевна Шестакова²,
Алёна Викторовна Старцева³, Алексей Аркадьевич Горбунов⁴

^{1, 2} Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

^{1✉} ludaananyina@mail.ru

² sheanton@mail.ru

³ Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия, frolova.al87@mail.ru

⁴ Институт технической химии УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия, agorbunof@mail.ru

Аннотация. В настоящем исследовании выявлена способность штамма *Salinicola socius* SMB35^T синтезировать фитогормон – индол-3-уксусную кислоту. Продукция фитогормона зависела от фазы роста бактерии. Изучено влияние инокуляции семян ауксинсинтезирующей бактерией *S. socius* SMB35^T на рост и холодоустойчивость озимого рапса в условиях *in vitro*. Установлено, что эффект являлся дозозависимым: применение 40 мг биомассы бактерии для обработки 1 г семян значительно снижало высоту побегов, отмечена тенденция к снижению длины корней, в то время как использование бактериальных клеток в концентрации в 2 раза ниже нивелировало негативный эффект и формировало тенденцию к увеличению средних показателей длины корней и высоты побегов. Исследовано действие бактериальной обработки семян на рост рапса (всхожесть и биомассу) при стрессе, вызванном низкой положительной температурой. Показано, что в условиях холода инокуляция семян ростостимулирующей концентрацией бактерии приводила к увеличению всхожести семян на 13.3% и биомассы проростков на 15.1%. Однако применение штамма *S. socius* SMB35^T не вызвало увеличения количества осмолитов, таких как сахароза и пролин, в проростках рапса. Напротив, обнаружено значимое снижение содержания сахарозы на 35.5%. Полученные результаты свидетельствуют о других механизмах взаимодействия бактерии и растения, приведших к увеличению устойчивости к холоду растений на раннем этапе развития. Экспериментально подтверждено, что определение концентрационной специфичности и последующее изучение альтернативных молекулярных механизмов взаимодействия бактерий с растениями являются ключевыми факторами для разработки эффективных микробных препаратов.

Ключевые слова: *Brassica napus* L., *Salinicola socius*, индол-3-уксусная кислота, холод, низкая температура

Для цитирования: Влияние бактерии *Salinicola socius* SMB35^T на рост озимого рапса при низкой положительной температуре / Л. Н. Ананьина, Е. А. Шестакова, А. В. Старцева, А. А. Горбунов // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 396–405. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-396-405>.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда и Министерства образования и науки Пермского края в рамках научного проекта № 24-26-20070.

MICROBIOLOGY

Original article

Effect of the *Salinicola socius* SMB35^T bacteria on the growth of winter rape at low positive temperature

Lyudmila N. Anan'ina^{1✉}, Elena A. Shestakova², Alena V. Startseva³,
Alexey A. Gorbunov⁴

^{1, 2} Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS – branch of the PFRC of the UB RAS, Perm, Russia

^{1✉} ludaananyina@mail.ru

² sheanton@mail.ru

³ Perm Agricultural Research Institute – branch of the PFRC of the UB RAS, Perm, Russia, frolova.al87@mail.ru

⁴ Institute of Technical Chemistry UB RAS – branch of the PFRC of the UB RAS, Perm, Russia, agorbunof@mail.ru

Abstract. This study demonstrates the ability of the *Salinicola socius* SMB35^T strain to synthesize the phytohormone indole-3-acetic acid. Moreover, its production depended on the bacterial growth phase. The effect of inoculation with the auxin-synthesizing bacterium *S. socius* SMB35^T on the growth and cold tolerance of winter rapeseed was studied *in vitro*. The effect was found to be dose-dependent: the use of 40 mg of bacterial biomass for treating 1 g of seeds significantly reduced the height of shoots, and a trend towards a decrease in root length was noted, while the use of bacteria at a concentration two times lower leveled the negative effect and formed a trend towards an increase in the average root length and shoot height. The effect of bacterial treatment of rapeseed on growth (germination and biomass) under cold stress was studied. Seed inoculation with a growth-promoting concentration of the bacterium resulted in a 13.3% increase in seed germination and a 15.1% increase in seedling biomass under cold conditions. However, the use of the *S. socius* SMB35^T strain did not increase the levels of osmolytes, such as sucrose and proline, in rapeseed seedlings. On the contrary, a significant decrease in sucrose content by 35.5% was observed. These results suggest other mechanisms of bacterial-plant interaction that lead to increased cold tolerance in early plant development. Thus, determining concentration specificity and subsequently studying alternative molecular mechanisms of bacterial-plant interactions are key to development of effective microbial preparations.

Keywords: *Brassica napus* L., *Salinicola socius*, indole-3-acetic acid, cold, low temperature

For citation: Anan'ina L. N., Shestakova E. A., Startseva A. V., Gorbunov A. A. [Effect of the *Salinicola socius* SMB35^T bacteria on the growth of winter rape at low positive temperature]. *Bulletin of the Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 396-405. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-396-405>.

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and the Ministry of Education and Science of Perm krai within the framework of scientific project no. 24-26-20070.

Введение

Успешная перезимовка озимого рапса напрямую связана с достижением растениями оптимального физиологического состояния до наступления зимы [Горлов, Бушнев, Асхадуллин, 2009; Бородько, 2020; Пилюк, 2020; Ториков и др., 2022; Фетюхин, Ахмадов, Алиев, 2023]. Ключевую роль в помощи растениям для преодоления абиотических стрессов, в том числе холода, играют ризосферные бактерии, стимулирующие рост растений (PGPB – Plant Growth-Promoting Bacteria). Большинство этих бактерий обладают способностью улучшать характеристики роста и урожайность в естественных условиях, осуществляя азотфиксацию, синтезируя фитогормоны, а также увеличивая доступность питательных веществ у многих растений, проводя дезаминирование молекулы-предшественника фитогормона этилена, накопление которого в корневой ткани, как известно, вредно для роста и развития корней [Glick, Penrose, Jiping, 1998; Максимов и др., 2015], индуцируя системную устойчивость растений к патогенным микроорганизмам [Lavania et al., 2006] и антагонизм по отношению к вредным микроорганизмам [Singh et al., 2010; ALKahtani et al., 2020]. В связи с этим обработка семенного материала перед посевом биологическими препаратами является перспективным приемом повышения устойчивости растений озимых культур к неблагоприятным условиям зимнего периода [Горьков, 2019; Березнов, Астарханова, Шаповал, 2022; Старцева, Акманаев, Майсак, 2024].

Одними из представителей группы PGPB являются бактерии рода *Salinicola*. В наземных биотопах бактерии рода *Salinicola* являются типичными компонентами микробиомов галофитов и населяют в том числе ткани надземных и подземных органов растений. Представители этого рода влияют на рост и развитие растений, разрушая токсичные органические соединения, увеличивая доступность минеральных компонентов, модулируя выработку или деградацию фитогормонов, а также подавляя патогены или поставляя растениям органические соединения, способствующие солеустойчивости [Plotnikova et al., 2020].

Цель исследования – оценить влияние бактерии *Salinicola socius* SMB35^T на ростовые показатели озимого рапса в опытах *in vitro*.

Материалы и методы исследования

Объект исследования. В работе использовали штамм *S. socius* SMB35^T. В качестве тестового объекта выбрали озимый рапс (*Brassica napus* L.) сорта 'Северянин' категории «первая репродукция» (PC1). Семена рапса предоставлены Пермским НИИСХ.

Среды и условия культивирования бактерий. Штамм бактерии хранили на плотной богатой питательной среде Раймонда [Plotnikova et al., 2011], содержащей хлорид натрия в концентрации 3%. Дальнейшие эксперименты проводили с использованием жидкой минеральной среды Раймонда (MCP) [Plotnikova et al., 2011]. В MCP добавляли хлорид натрия до концентрации 5%. Источником углерода и энергии в MCP служила глюкоза в конечной концентрации 1 г/л. Культивирование проводили в течение 24 ч при 25°C на роторной качалке со скоростью вращения 100 об/мин. Далее биомассу собирали, центрифуги-

гируя суспензию клеток при 10 000 x g в течение 10 мин в условиях комнатной температуры. Культуральную жидкость сливали.

Изучение роста бактерии в условиях низкой температуры. Культивирование бактерии осуществляли на агаризованной МСР [Plotnikova et al., 2011], содержащей 2% хлорида натрия и глюкозу в конечной концентрации 1 г/л. Инокулятом служила культура, выращенная до стационарной фазы в жидкой МСР с тем же количеством хлорида натрия и ростового субстрата. Биомассу на плотную питательную среду наносили штрихом микробиологической петлей. Рост при температуре 5°C оценивали каждые седьмые сутки.

Детекция индол-3-уксусной кислоты. Штамм *S. socius* SMB35^T выращивали в 1% триптоновом бульоне как с добавлением триптофана (150 мг/л), так и без него. Предварительно среду разливали в колбы по 20 мл, автоклавировали при 0.5 АТМ в течение 30 мин. Затем вносили бактерию и инкубировали в течение 2 сут. Из полученной суспензии отбирали 1.5 мл и центрифугировали при 10 000 x g в течение 2 мин. Определение индол-3-уксусной кислоты (ИУК) проводили в 1.5 мл супернатанта согласно методике, описанной Glickmann, Dessaux [1995]. Пробирки инкубировали в темноте при комнатной температуре в течение 30 мин. Развитие розовой окраски свидетельствовало о присутствии ИУК. В качестве отрицательного контроля использовали среду без добавления бактерии.

Обработка семян рапса бактерией. Семена стерилизовали, сначала помещая на 15 мин в 3% раствор перекиси водорода, затем выдерживая в течение 15 мин в 1% растворе перманганата калия. На следующем этапе семена отмывали дистиллированной водой до получения прозрачного раствора. Как правило, инокуляцию семян проводят, выдерживая их в суспензии клеток бактерии. Однако концентрация хлорида натрия в среде культивирования бактерии является слишком высокой для растений. В связи с этим обработку осуществляли сырой биомассой бактерии. К 40 или 20 мг сырой биомассы бактерии добавляли 1 г стерилизованных семян озимого рапса. Выдерживали в течение 30 мин, периодически встряхивая для распределения бактерий по семенам.

Условия культивирования растений. Эксперименты проводили в чашках Петри. 25 семян рапса помещали на фильтровальную бумагу, предварительно увлажненную 5 мл дистиллированной воды. Инкубирование проводили в темноте при 25°C или 5°C. В ходе эксперимента дистиллированную воду добавляли порциями по 1 мл с разной периодичностью в зависимости от температуры: при 25°C – каждые третьи сутки, а при 5°C – каждые седьмые сутки. Всхожесть, высоту побегов и длину корней определяли на седьмые сутки культивирования. Сырую массу (СМ) проростков определяли через 14 дней. Для этого проростки промокали фильтровальной бумагой, затем взвешивали.

Подготовка экстрактов из проростков растений. Проростки, отобранные из одной чашки, промывали 3 раза дистиллированной водой, затем растирали с кварцевым песком. К полученной суспензии добавляли 80% раствор этанола. Экстракцию проводили в течение 2 ч на встряхивателе АВ 30-С (Россия) при комнатной температуре. Остатки клеток и кварцевый песок осаждали, центрифугируя при 10 000 x g в течение 3 мин. Раствор отбирали. Экстракт упаривали при температуре 45°C.

Спектроскопия протонного магнитного резонанса. Определение осмолитов проводили с помощью спектроскопии протонного магнитного резонанса на приборе Bruker Avance Neo 400 (400 МГц). При записи спектров ЯМР ¹H использовали 30-градусные импульсы, релаксационная задержка составляла 1 с, ширина спектрального окна была равна 5.9 кГц. Данные обрабатывали с помощью программного обеспечения Topspin, версия 4.0.8 (Bruker Corporation, США). Высушенный осадок этанольного экстракта растворяли в 0.50 мл D₂O (ООО «Кемикал Лайн», Россия). Спектр предварительно записывали с 8 накоплениями, затем в пробу вносили внутренний стандарт, серную кислоту и записывали спектр с 64 накоплениями, который использовали для количественных расчетов. 0.7–1.0 мг серной кислоты вносили с целью смещения химических сдвигов пролина в слабое поле, в область, свободную от сигналов других веществ. Химические сдвиги (δ) указывали в миллионных долях (м.д.) и измеряли относительно сигнала HDO (4.71 м.д.). В качестве внутреннего стандарта использовали малеиновую кислоту, после подкисления имеющую сигнал при 6.32–6.35 м.д. Идентификацию сигналов в спектре проводили добавлением в исследуемые растворы коммерческих препаратов соответствующих соединений. Химические сдвиги пиков, использованных для интегрирования, составили 4.14 м.д. для пролина (α-CH, дублет дублетов) и 5.40 м.д. – для сахарозы (аномерный протон, дублет). Количества соединений рассчитывали путем сравнения площади пика соединения с площадью пика внутреннего стандарта [Nagata et al., 1996].

Поиск генов в геноме *S. socius* SMB35^T. Поиск генов, кодирующих ферменты синтеза ИУК, осуществляли в геноме *S. socius* SMB35^T, депонированном в Genbank под номером PRJNA357614.

Статистическая обработка результатов. Оценку статистической достоверности различий средних значений проводили с использованием t-критерия Стьюдента в Microsoft Office Excel 2003.

Результаты и их обсуждение

Штамм *S. socius* SMB35^T проверили на способность синтезировать ИУК. Для этого бактерию выращивали в 1% триптовом бульоне с добавлением триптофана. Детекцию ИУК проводили, отбирая образцы клеточной суспензии через 5, 24 и 48 ч культивирования. Добавление реактива Сальковского спустя 5 ч культивирования не привело к изменению цвета культуральной жидкости. После внесения реактива Сальковского в суточную культуру было отмечено изменение цвета культуральной жидкости на розовый, это свидетельствовало о наличии в среде гетероауксина. Спустя 48 ч культивирования также фиксировали положительный результат после добавления реактива. Кроме того, изучена способность исследованного штамма синтезировать ауксин в 1%-ном триптовом бульоне без дополнительного внесения триптофана. Спустя 48 ч инкубирования в культуральную жидкость добавили реактив Сальковского, что привело к развитию розового окрашивания раствора. Зависимость синтеза ИУК от фазы роста описана для представителей разных таксонов прокариот. У большинства из них, за исключением штаммов рода *Pseudomonas*, максимальное количество этого соединения было обнаружено в стационарной фазе роста [Мирзоева, Широких, 2010]. В геноме штамма *S. socius* SMB35^T осуществлен поиск генов, ассоциированных с синтезом ауксинов. В настоящей работе гены, продукты которых идентифицированы как ферменты синтеза гетероауксина, в геноме бактерии *S. socius* SMB35^T не выявлены. Представители многих видов рода *Salinicola*, например, *S. halimionae*, *S. aestuarinus*, *S. endophyticus*, *S. halophyticus*, *S. lusitanus* и *S. salarius*, в том числе штаммы вида *S. socius*, продуцируют гормон ИУК [Fidalgo et al., 2019; Lavanya, Deepika, Sridevi, 2023]. Однако, несмотря на это, конкретные метаболические пути, обеспечивающие выработку ИУК, как и гены, кодирующие ферменты его синтеза, у представителей этого рода до сих пор не описаны. Между тем, в геноме исследованного штамма присутствовал ген, продукт которого осуществляет экскрецию гетероауксина из клетки (GenBank №OLO06226), что также косвенно подтверждает способность бактерии синтезировать ИУК.

Влияние инокуляции семян бактерией *S. socius* SMB35^T на рост озимого рапса. В данной работе изучили влияние разного количества бактерии *S. socius* SMB35^T на морфометрические показатели проростков озимого рапса при оптимальной температуре, соответствующей 25°C (табл. 1).

Таблица 1

Влияние инокуляции семян бактерией *S. socius* SMB35^T на рост озимого рапса при оптимальной температуре

[The effect of seed inoculation with *S. socius* SMB35^T on the growth of winter rapeseed at optimal temperature]

Вариант эксперимента	Параметр			
	Высота стеблей, мм	Длина корней, мм	Мин-Макс высота стеблей, мм	Мин-Макс длина корней, мм
40 мг бактериальной биомассы/г семян				
Контроль	29.4±10.0	44.2±35.9	3–50	5–120
Семена, обработанные бактерией	23.5±11.0*	37.9±31.8	3–50	3–110
20 мг бактериальной биомассы/г семян				
Контроль	37.4±14.3	44.3±36.9	5–75	2–125
Семена, обработанные бактерией	40.2±13.9	48.9±38.8	15–80	4–135

Примечание: * –различия достоверны при $p \leq 0.01$. Три биологических повторности.

Для этого использовали 20 или 40 мг сырой бактериальной биомассы для обработки 1 г семян. Показано, что действие бактерии зависело от количества биомассы. Так, использование 40 мг биомассы значительно снижало высоту побегов, отмечен тренд к уменьшению длины корней (табл. 1). Помимо этого, значения минимальной и максимальной величин корней у проростков, выросших из инокулированных бактерией семян, были ниже, чем в контрольной группе (табл. 1), в то время как снижение количества биомассы бактерии до 20 мг в обработке семян нивелировало негативный эффект. Более того, хотя достоверно значимого различия высоты побегов и длины корней между проростками, выросшими из обработанных бактерией семян, и контролем не получено, очевидна тенденция на увеличение этих показателей в опытной группе (табл. 1). Кроме того, у инокулированных бактерией проростков наблюдалось возрастание минимальных и максимальных значений высоты побегов и длины корней по сравнению с контролем (табл. 1), что указывает на стимуляцию роста. Опираясь на полученные данные, в последующих экспериментах использовали 20 мг биомассы штамма *S. socius* SMB35^T.

Таким образом, характер действия бактерий на рост растений напрямую зависит от их концентрации. Оптимальные концентрации способствуют развитию растений, стимулируя, в частности, рост корней и побегов, вероятно, посредством синтеза фитогормонов. В то же время превышение концентрации может привести к гормональным нарушениям, вызывая угнетение корнеобразования, морфологические аномалии и гибель растений [Li et al., 2022; dos Santos et al., 2022; Васильев и др., 2025].

Влияние инокуляции семян бактерией *S. socius* SMB35^T на всхожесть и биомассу проростков озимого рапса при низкой положительной температуре. Инкубирование штамма *S. socius* SMB35^T в течение длительного периода (мес.) позволило выявить его способность к росту при температуре 5°C. В конце третьей недели культивирования на плотной МСР штамм формировал в основании штриха множество мелких колоний диаметром менее 1 мм. В связи с тем, что исследованный штамм сохраняет физиологическую активность при низкой температуре, исследовали его влияние на рост озимого рапса в условиях холода. Семена озимого рапса обрабатывали бактерией и культивировали в течение 2 недель в темноте при температуре 5°C. В контрольной и опытной группах параметры всхожести семян отличались. Отмечено увеличение всхожести инокулированных бактерией семян на 13.3% (табл. 2). В конце эксперимента оценка сырой биомассы проростков показала ее возрастание на 15.1% в опытной группе.

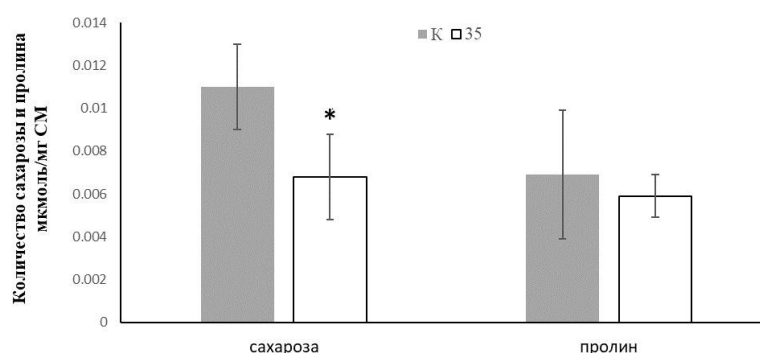
Таблица 2

Всхожесть семян и биомасса проростков озимого рапса при низкой положительной температуре
[Germination and biomass of winter rapeseed at low positive temperature]

Вариант эксперимента	Всхожесть, %	Изменение биомассы относительно контроля, %
Контроль	43.3±13.0	100±13.3
Опыт	56.6±13.3*	115.1±20.3*

Примечание: * – различия достоверны при $p \leq 0.05$. Три независимых эксперимента в 3-х биологических повторностях.

Холодовой стресс сопровождается обезвоживанием, повышением осмотического давления, а также окислительным стрессом. Это приводит к повреждению мембран и ДНК, денатурации белков. Осмолиты в значительной степени снижают негативное действие стрессовых факторов на макромолекулы и компоненты клеток. Известно, что в адаптации растений к низким температурам немаловажную роль играют низкомолекулярные органические соединения, такие как сахара и аминокислоты, в частности сахароза и пролин [Moieni-Korbekandi, Karimzadeh, Sharifi, 2014; Jankovska-Bortcevič et al., 2019; Lei et al., 2019]. Поэтому было исследовано влияние бактерии на синтез клетками растений этих соединений. Сравнение внутриклеточных количеств сахарозы и пролина в проростках из семян, обработанных клетками *S. socius* SMB35^T, и проростках из контрольной группы выявило достоверно значимое снижение количества сахарозы на 35.5% в проростках опытной группы (см. рисунок). В меньшей степени изменилось содержание пролина. Отмечена тенденция к снижению его количества на 13.4% в проростках из семян, обработанных бактерией. Как правило, у инокулированных бактерией растений значительно повышался уровень пролина, но на более поздних стадиях роста [Barka et al., 2006; Mishra et al., 2009].



Влияние инокуляции семян бактерией *S. socius* SMB35^T на аккумуляцию осмолитов проростками рапса при низкой положительной температуре:

К – проростки из семян, необработанных бактерией, 35 – проростки из семян, обработанных бактерией,
* – различия достоверны при $p \leq 0.01$. Три независимых эксперимента в 3-х биологических повторностях

[The effect of seed inoculation with *S. socius* SMB35^T on the accumulation of osmolytes by rapeseed seedlings at low positive temperatures:

K – seedlings from seeds untreated with the bacterium, 35 – seedlings from seeds treated with the bacterium,
* – the differences are significant at $p \leq 0.01$. Three independent experiments in 3 biological replications]

Между тем, к снижению количества пролина в клетках растений в условиях холодового стресса может приводить предварительная обработка ауксинами [Jankauskienė et al., 2022]. В некоторых случаях ауксины могут ингибировать процессы, приводящие к накоплению сахарозы [Тао et al., 2022]. По-видимому, это связано с развитием метаболических изменений, способствующих повышению холодоустойчивости за счет других механизмов. Так, было показано, что ауксины содействуют холодовой акклиматизации, увеличивая выработку дегидринов (термостабильных гидрофильных белков), а также модулируя состав и количество полиаминов, снижая содержание малонового диальдегида и перекиси водорода [Jankauskienė et al., 2022; Jankovska-Bortkevič et al., 2023]. Малоновый диальдегид служит основным маркером перекисного окисления липидов и конечным продуктом повреждения жирных кислот, в то время как перекись водорода сама по себе является свободным радикалом, который генерирует другие более опасные свободные радикалы и участвует в окислительном повреждении клеток.

Поскольку пролин и сахароза играют важную роль в борьбе растений с окислительным стрессом, действуя как эффективные антиоксиданты, удаляя активные формы кислорода и стабилизируя клеточные компоненты, такие как мембраны и белки [Hayat et al., 2012], спад их количества может быть следствием снижения негативного действия окислительного стресса, вызванного низкой температурой.

Растительный гормон гетероауксин является одним из ключевых регуляторов роста и развития растений, занимая ключевое место, обеспечивая интеграцию сигналов абиотического стресса и контроле последующих реакций [Musazade, Mrisho., Fen, 2025]. В условиях холода уровень синтеза ИУК снижается и нарушается его транспорт между клетками. Это обусловлено, в том числе, нарушением работы PIN-белков, которые играют ключевую роль в эпитопальном транспорте гетероауксина [Zhu et al., 2015]. Бактерии, продуцирующие ИУК, могут способствовать восстановлению его уровня в клетках растения, тем самым повышая устойчивость к стрессам и стимулируя рост. Это взаимодействие делает ауксинпродуцирующие бактерии перспективным инструментом для создания биопрепаратов, помогающих растениям справляться с неблагоприятными абиотическими факторами внешней среды.

Заключение

Проведенное исследование позволило установить существенное влияние инокуляции семян ауксин-синтезирующей бактерией *S. socius* SMB35^T на рост озимого рапса, который носит дозозависимый характер. Полученные результаты указывают на то, что оптимальная концентрация бактериального штамма SMB35 стимулирует ключевые показатели роста, такие как длина побегов и корней. В то же время превышение оптимальной концентрации приводит к эффекту ингибирования. Применение бактериальных клеток в концентрации, стимулирующей рост, позволило добиться статистически значимого увеличения всхожести семян и биомассы проростков рапса при низкой положительной температуре. Несмотря на это, инокулирование семян бактерией *S. socius* SMB35^T не привело к увеличению количества осмолитов (сахарозы и пролина) в проростках рапса. Таким образом, определение концентрационной специфичности взаимодействия «бактерия – растение» является важным условием для разработки эффективных и экологически безопасных микробных препаратов для сельского хозяйства. Перспективы работы видятся в продолжении исследований молекулярных аспектов взаимодействия растений с бактериями.

Список источников

1. Березнов А.В., Астарханова Т.С., Шаповал О.А. Регуляторы роста растений повышают продуктивность озимого рапса // Защита и карантин растений. 2022. № 10. С. 19–20. DOI: 10.47528/1026-8634_2022_10_19. EDN: YQGBKB.
2. Бородько А.А. Влияние различных сроков сева на развитие растений и перезимовку рапса озимого в условиях центральной части Беларуси // Земледелие и селекция в Беларуси. 2020. Т. 56. С. 124–131. EDN: AUAYJE.
3. Васильев И.А. и др. Влияние активности микроорганизмов, выделенных из ризосферы *Hedysarum zundukii*, на рост и развитие растений пшеницы // Известия ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15, № 1. С. 17–23. DOI: 10.21285/achb.958. EDN: WZTRIV.
4. Горлов С.Л., Бушнев А.С., Асхадуллин Д.Ф. Оптимизация сроков сева озимого рапса в различных зонах // Земледелие. 2009. № 7. С. 34–35. EDN KXCFCR.
5. Горьков А.А. Агробиологическое обоснование применения биопрепаратов для озимой пшеницы // Вестник аграрной науки. 2019. № 5. С. 133–139. DOI: 10.15217/issn2587-666X.2019.5.133. EDN: YIVHXS.
6. Максимов И. и др. Стимулирующие рост растений бактерии в регуляции устойчивости растений к стрессовым факторам // Физиология растений. 2015. Т. 62. С. 763–775. DOI: 10.7868/S0015330315060111. EDN: UIMFKT.
7. Мерзаева О.В., Широких И.Г. Образование ауксинов эндофитными актинобактериями озимой ржи // Прикладная биохимия и микробиология. 2010. Т. 46, № 1. С. 51–57. EDN: KZMAST.

8. Пилюк Я.Э. Перезимовка и продуктивность озимого рапса в Беларуси и пути их повышения // Земледелие и селекция в Беларуси. 2020. № 56. С. 224–235. EDN: RZMWSX.
9. Старцева А.В., Акманаев Э.Д., Майсак Г.П. Особенности осеннего развития тритикале озимой при использовании биологических препаратов в условиях среднего Предуралья // Journal of Agriculture and Environment. 2024. № 4. DOI: 10.23649/JAE.2024.44.5. EDN: CMSVUG.
10. Ториков В.Е. и др. Урожайность масло-семян озимого рапса в зависимости от типа почв и уровня минерального питания // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 6(94). С. 26–33. DOI: 10.52691/2500-2651-2022-94-6-26-33. EDN: EKKYSE.
11. Фетюхин И.В., Ахмадов Б.Р., Алиев В.И. Сроки посева озимого рапса в условиях приазовской зоны Ростовской области // Аграрная наука и производство в условиях становления цифровой экономики Российской Федерации: материалы Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. Персиановский, 2023. Т. 1. С. 178–182. EDN: QMOIXT.
12. ALKahtani M.D.F. et al. Isolation and characterization of plant growth promoting endophytic bacteria from desert plants and their application bioinoculants for sustainable agriculture // Agronomy. 2020. Vol. 10. Art. 1325. DOI: 10.3390/agronomy10091325. EDN: GKRTDS.
13. Barka A.E., Nowk J., Clement C. Enhancement of chilling resistance of inoculated grapevine plantlets with plant growth promoting rhizobacteria *Burkholderia phytofermans* strain PsJN // Applied and Environmental Microbiology. 2006. Vol. 72. P. 7246–7252.
14. dos Santos R.M. et al. Inoculum concentration and mineral fertilization: effects on the endophytic microbiome of soybean // Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 7, № 13. Art. 900980. DOI: 10.3389/fmicb.2022.900980.
15. Fidalgo C. et al. The endosphere of the salt marsh plant *Halimione portulacoides* is a diversity hotspot for the genus *Salinicola*: description of five novel species *Salinicola halimionae* sp. nov., *Salinicola aestuarinus* sp. nov., *Salinicola endophyticus* sp. nov., *Salinicola halophyticus* sp. nov., *Salinicola lusitanus* sp. nov. // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2019. Vol. 69, № 1. P. 46–62. DOI: 10.1099/ijsem.0.003061. EDN: UVAKWY.
16. Glick B.R., Penrose D.M., Jiping L. A model for the lowering plant ethylene concentrations by plant growth promoting bacteria // Journal of Theoretical Biology. 1998. Vol. 190. P. 63–68.
17. Glickmann E., Dessaux Y. A critical examination of the specificity of the salkowski reagent for indolic compounds produced by phytopathogenic bacteria // Applied and Environmental Microbiology. 1995. Vol. 61, № 2. P. 793–796. DOI: 10.1128/aem.61.2.793-796.1995.
18. Hayat S. et al. Role of proline under changing environments: a review // Plant Signaling and Behavior. 2012. Vol. 7, № 11. P. 1456–1466. DOI: 10.4161/psb.21949.
19. Jankovska-Bortkevič E. et al. Response of winter oilseed rape to imitated temperature fluctuations in autumn-winter period // Environmental and Experimental Botany. 2019. Vol. 166. Art. 103801. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.103801.
20. Jankovska-Bortkevič E. et al. Effects of auxin-type plant growth regulators and cold stress on the endogenous polyamines in pea plants // Horticulturae. 2023. Vol. 9, № 2. Art. 244. DOI: 10.3390/horticulturae9020244.
21. Jankauskienė J. et al. The application of auxin-like compounds promotes cold acclimation in the oilseed rape plant // Life. 2022. Vol. 12, № 8. Art. 1283. DOI: 10.3390/life12081283.
22. Lavana M. et al. Induction of plant defense enzymes and phenolics by treatment with plant growth-promoting rhizobacteria *Serratia marcescens* NBRI1213 // Current Microbiology. 2006. Vol. 52. P. 363–368. DOI: 10.1007/s00284-005-5578-2.
23. Lavanya P.J., Deepika D.S., Sridevi M. Screening and isolation of plant growth promoting, halotolerant endophytic bacteria from mangrove plant *Avicennia officinalis* L. at coastal region of corangi andhra // Agricultural Science Digest. 2023. Vol. 43, № 1. P. 51–56. DOI: 10.18805/ag.D-5607.
24. Lei Y. et al. Physiological and molecular responses to cold stress in rapeseed (*Brassica napus* L.) // Journal of Integrative Agriculture. 2019. Vol. 18, № 12. P. 2742–2752.
25. Li Q. et al. A plant growth-promoting bacteria *Priestia megaterium* JR48 induces plant resistance to the crucifer black rot via a salicylic acid-dependent signaling pathway // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 10, № 13. Art. 1046181. DOI: 10.3389/fpls.2022.1046181.
26. Mishra P.K. et al. Alleviation of cold stress in inoculated wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings with psychrotolerant *Pseudomonads* from NW Himalayas // Archives of Microbiology. 2011. Vol. 193, № 7. P. 497–513. DOI: 10.1007/s00203-011-0693-x.
27. Moieni-Korbekandi Z., Karimzadeh G., Sharifi M. Cold-induced changes of proline, malondialdehyde and chlorophyll in spring canola cultivars // Journal of Plant Physiology and Breeding. 2014. Vol. 4, № 1. P. 1–11.
28. Musazade E., Mrisho I.I., Fen X. Auxin metabolism and signaling: integrating independent mechanisms and crosstalk in plant abiotic stress responses // Plant Stress. 2025. Vol. 18. DOI: 10.1016/j.stress.2025.101034.

29. Nagata S., Adachi K., Sano H. NMR analyses of compatible solutes in a halotolerant *Brevibacterium* sp. // Microbiology. 1996. Vol. 142. P. 3355–3362.
30. Plotnikova E.G. et al. *Salinicola* // Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria, 2020.
31. Plotnikova E.G. et al. *Thalassospira permensis* sp. nov., a new terrestrial halotolerant bacterium isolated from a naphthalene-utilizing microbial consortium // Mikrobiologiya. 2011. Vol. 80. P. 691–699. EDN: OFAEFV.
32. Singh N. et al. Biological control of *Macrophomina phaseolina* by chemotactic fluorescent *Pseudomonas aeruginosa* PN1 and its plant growth promontory activity in chir-pine // Crop Protection. 2010. Vol. 29, № 10. P. 1142–1147.
33. Tao X. et al. Understanding of exogenous auxin in regulating sucrose metabolism during postharvest tomato fruit ripening // Postharvest Biology and Technology. 2022. Vol. 189. Art. 111913. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2022.111913.
34. Zhu J. et al. Low temperature inhibits root growth by reducing auxin accumulation via ARR1/12 // Plant and Cell Physiology. 2015. Vol. 56, № 4. P. 727–736. DOI: 10.1093/pcp/pcu217.

References

1. Bereznov A.V., Astarkhanova T.S., Shapoval O.A. [Plant growth regulators increase the productivity of winter rape]. *Zaščita i karantin rastenij*. No. 10 (2022): pp. 19-20. (In Russ.). DOI: 10.47528/1026-8634_2022_10_19.
2. Borod'ko A.A. [The influence of different sowing dates on plant development and wintering of winter rape in the conditions of the central part of Belarus]. *Zemledelie i selekcija v Belarusi*. V. 56 (2020): pp. 124-131 (In Russ.).
3. Vasil'yev I.A., Karepova M.S., Markova Yu.A., Petrushin I.S. [Effect of the activity of microorganisms isolated from the rhizosphere of *Hedysarum zundukii* on the growth and development of wheat plants]. *Izvestija VUZov. Prikladnaja chimija i biotehnologija*. V. 15, No. 1 (2025): pp. 17-23 (In Russ.). DOI: 10.21285/achb.958.
4. Gorlov S.L., Bushnev A.S., Askhadullin D.F. [Optimization of sowing dates for winter rapeseed in different zones]. *Zemledelie*. No. 7 (2009): pp. 34-35. (In Russ.).
5. Gor'kov A.A. [Agrobiological justification for the use of biopreparations for winter wheat]. *Vestnik agrarnoj nauki*. No. 5 (2019): pp. 133-139. (In Russ.).
6. Maksimov I., Veselova S., Nuzhnaya T., Sarvarova Ye., Khayrullin R. [Plant growth-stimulating bacteria in the regulation of plant resistance to stress factors]. *Fiziologija rastenij*. V. 62 (2015): pp. 763-775. DOI: 10.7868/S0015330315060111. (In Russ.).
7. Merzaeva O.V., Shirokikh I.G. [Formation of auxins by endophytic actinobacteria of winter rye]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. V. 44, No. 3 (2008): pp. 334-340. (In Russ.).
8. Pilyuk Ya.E. [Overwintering and productivity of winter rapeseed in Belarus and ways to improve them]. *Zemledelie i selekcija v Belarusi*. No. 56 (2020): pp. 224-235. (In Russ.).
9. Startseva A.V., Akmanayev E.D., Maysak G.P. [Features of autumn development of winter triticale using biological preparations in the conditions of the middle Cis-Urals]. *Journal of Agriculture and Environment*. No. 4 (2024). DOI 10.23649/JAE.2024.44.5.
10. Torikov V.Ye., Shakov V.M., Polenok A.V., Samotorov A.R., Sedov D.I. [Yield of winter rapeseed oilseeds depending on soil type and mineral nutrition level]. *Vestnik Brjanskoj gosudarstvennoj sel'skochozajstvennoj akademii*. No. 6(94) (2022): pp. 26-33. (In Russ.). DOI: 10.52691/2500-2651-2022-94-6-26-33. EDN: EKKYSE.
11. Fetyukhin I.V., Akhmadov B.R., Aliyev V.I. [Terms of sowing winter rapeseed in the conditions of the Azov zone of the Rostov region]. *Agrarnaja nauka i proizvodstvo v uslovijach stanovlenija cifrovoj èkonomiki Rossijskoj Federacii* [Agricultural science and production in the context of the formation of the digital economy of the Russian Federation: proceedings of the International Scientific and Practical Conference] Persianovskij, Donskoj agrarnyj universitet Publ., 2023, V. 1, pp. 178-182. (In Russ.). EDN: QMOIXT.
12. ALKahtani M.D.F., Fouda A., Attia K., Al-Otaibi F., Eid A.M., Ewais E., Hijri M., St-Arnaud M., Hassan S., Khan N., Hafez Y.M., Abdelaa K.A.A. Isolation and characterization of plant growth promoting endophytic bacteria from desert plants and their application bioinoculants for sustainable agricultureю. *Agronomy*. V. 10 (2020). Art. 1325. DOI: 10.3390/agronomy10091325.
13. Barka A.E., Nowk J., Clement C. Enhancement of chilling resistance of inoculated grapevine plantlets with plant growth promoting rhizobacteria *Burkholderia phytofermans* strain PsJN. *Applied and Environmental Microbiology*. V. 72 (2006): pp. 7246-7252.
14. dos Santos R.M., Cueva-Yesquén L.G., Garboggini F.F., Desoignies N., Rigobelo E.C. Inoculum concentration and mineral fertilization: effects on the endophytic microbiome of soybean. *Front. Microbiol.* V. 7, No. 13 (2022). Art. 900980. DOI: 10.3389/fmicb.2022.900980.

15. Fidalgo C., Proença D.N., Morais P.V., Henriques I., Alves A. The endosphere of the salt marsh plant *Halimione portulacoides* is a diversity hotspot for the genus *Salinicola*: description of five novel species *Salinicola halimionae* sp. nov., *Salinicola aestuarinus* sp. nov., *Salinicola endophyticus* sp. nov., *Salinicola halophyticus* sp. nov., *Salinicola lusitanus* sp. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. V. 69, No. 1 (2019): pp. 46-62. DOI: 10.1099/ijsem.0.003061.
16. Glick B.R., Penrose D.M., Jiping L. A model for the lowering plant ethylene concentrations by plant growth promoting bacteria. *Journal of Theoretical Biology*. V. 190 (1998): pp. 63-68.
17. Glickmann E., Dessaux Y. A critical examination of the specificity of the salkowski reagent for indolic compounds produced by phytopathogenic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. V. 61, No. 2 (1995): pp. 793-796. DOI: 10.1128/aem.61.2.793-796.1995.
18. Hayat S., Hayat Q., Alyemeni M.N., Wani A.S., Pichtel J., Ahmad A. Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signaling and Behavior*. V. 7, No. 11 (2012): pp. 1456-1466. DOI: 10.4161/psb.21949. Epub 2012 Sep 5.
19. Jankovska-Bortkevič E., Gaveliene V., Koryzniene D., Jankauskiene, J., Mockeviciute R., Jurkoniene S. Response of winter 'oilseed rape to imitated temperature fluctuations in autumn-winter period. *Environmental and Experimental Botany*. V. 166 (2019): Art. 103801. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.103801.
20. Jankovska-Bortkevič E., Katerova Z., Todorova D., Jankauskienė J., Mockevičiūtė R., Sergiev I., Jurkonienė S. Effects of auxin-type plant growth regulators and cold stress on the endogenous polyamines in pea plants. *Horticulturae*. V. 9, No. 2 (2023). Art. 244. DOI: 10.3390/horticulturae9020244.
21. Jankauskienė J., Mockevičiūtė R., Gavelienė V., Jurkonienė S., Anisimovienė N. The application of auxin-like compounds promotes cold acclimation in the oilseed rape plant. *Life*. V. 12, No. 8 (2022). Art. 1283. DOI: 10.3390/life12081283.
22. Lavania M., Chauhan P.S., Chauhan S.V.S., Singh H.B., Nautiyal C.S. Induction of plant defense enzymes and phenolics by treatment with plant growth-promoting rhizobacteria *Serratia marcescens* NBRI1213. *Current Microbiology*. V. 52 (2006): pp. 363-368. DOI: 10.1007/s00284-005-5578-2.
23. Lavanya P.J., Deepika D.S., Sridevi M. Screening and isolation of plant growth promoting, halotolerant endophytic bacteria from mangrove plant *Avicennia officinalis* L. at coastal region of corangi Andhra. *Agricultural Science Digest*. V. 43, No. 1 (2023): pp. 51-56. DOI: 10.18805/ag.D-5607.
24. Lei Y., Tariq S., Yong C., Yan L., Xue-Kun Z., Xi-ling Z. Physiological and molecular responses to cold stress in rapeseed (*Brassica napus* L.). *Journal of Integrative Agriculture*. V. 18, No. 12 (2019): pp. 2742-2752.
25. Li Q., Hou Z., Zhou D., Jia M., Lu S., Yu J. A plant growth-promoting bacteria *Priestia megaterium* JR48 induces plant resistance to the crucifer black rot via a salicylic acid-dependent signaling pathway. *Front. Plant. Sci*. V. 10, No. 13 (2022). Art. 1046181. DOI: 10.3389/fpls.2022.1046181.
26. Mishra P.K., Bisht S.C., Ruwari P., Selvakumar G., Joshi G.K., Bisht J.K., Bhatt J.C., Gupta H.S. Alleviation of cold stress in inoculated wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings with psychrotolerant *Pseudomonads* from NW Himalayas. *Archives of Microbiology*. V. 193, No. 7 (2011): pp. 497-513. DOI: 10.1007/s00203-011-0693-x.
27. Moieni-Korbekandi Z., Karimzadeh G., Sharifi M. Cold-induced changes of proline, malondialdehyde and chlorophyll in spring canola cultivars. *Journal of Plant Physiology and Breeding*. V. 4, No. 1 (2014): pp. 1-11.
28. Musazade E., Mrisho I.I., Fen X. Auxin metabolism and signaling: integrating independent mechanisms and crosstalk in plant abiotic stress responses. *Plant stress*. V. 18 (2025). DOI: 10.1016/j.stress.2025.101034.
29. Nagata S., Adachi K., Sano H. NMR analyses of compatible solutes in a halotolerant *Brevibacterium* sp. *Microbiology*. V. 142 (1996): pp. 3355-3362.
30. Plotnikova E.G., Anan'ina L.N., Ariskina E.V., Evtushenko L.I. *Salinicola*. Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria, 2020.
31. Plotnikova E.G., Anan'ina L.N., Krausova V.I., Ariskina E.V., Prisyazhnaya N.V., Lebedev A.T., Demakov V.A., Evtushenko L.I. *Thalassospira permensis* sp. nov., a new terrestrial halotolerant bacterium isolated from a naphthalene-utilizing microbial consortium. *Mikrobiologiya*. V. 80 (2011): pp. 691-699.
32. Singh N., Kumar S., Bajpai V.K., Dubey R.C., Maheashwari D.K., Kang S.C. Biological control of *Macrophomina phaseolina* by chemotactic fluorescent *Pseudomonas aeruginosa* PN1 and its plant growth promontory activity in chir-pine. *Crop Protection*. V. 29, No. 10 (2010): pp. 1142-1147.
33. Tao X., Wu Q., Fu X., Zhu B., Chen F., Liu B., Mao L., Luo Z., Li L., Ying T. Understanding of exogenous auxin in regulating sucrose metabolism during postharvest tomato fruit ripening. *Postharvest Biology and Technology*. V. 189 (2022). Art. 111913. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2022.111913.
34. Zhu J., Zhang K.-X., Wang W.-S., Gong W., Liu W.-C., Chen H.-G., H.-H., Lu Y.-T. Low temperature inhibits root growth by reducing auxin accumulation via ARR1/12. *Plant and Cell Physiology*. V. 56, No. 4 (2015): pp. 727-736. DOI: 10.1093/pcp/pcu217.

Статья поступила в редакцию 13.10.2025; одобрена после рецензирования 03.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 13.10.2025; approved after reviewing 03.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

Л. Н. Ананьина – канд. биол. наук, старший научный сотрудник;

Е. А. Шестакова – инженер;

А. В. Старцева – научный сотрудник;

А. А. Горбунов – канд. хим. наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

L. N. Anan'ina, candidate of biology, senior researcher of laboratory;

E. A. Shestakova, engineer;

A. V. Startseva, researcher;

A. A. Gorbunov, candidate of chemical sciences, senior researcher.

Вклад авторов:

Ананьина Л. Н. – научное руководство; разработка концепции; получение финансирования; проведение исследования; формальный анализ; курирование данных; рецензирование; редактирование.

Шестакова Е. А. – проведение исследования.

Старцева А. В. – рецензирование; редактирование.

Горбунов А. А. – курирование данных; рецензирование; редактирование.

Contribution of the authors:

Anan'ina L. N. – supervision; conceptualization; funding acquisition; investigation; formal analysis; data curation; writing – original draft.

Shestakova E. A. – investigation.

Startseva A. V. – writing – review; editing.

Gorbunov A. A. – data curation; writing – review; editing.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.