

ВЛИЯНИЕ БАКТЕРИЙ, МЕТАБОЛИЗИРУЮЩИХ АБСЦИЗОВУЮ КИСЛОТУ, НА РОСТ И СОДЕРЖАНИЕ АБК В РАСТЕНИЯХ ПШЕНИЦЫ И ПОЧВЕ ПРИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ИХ ПОСАДКИ¹

© 2024 г. Е. В. Мартыненко¹, Л. Ю. Кузьмина¹, Э. Р. Гаффарова¹, А. С. Рябова¹,
Г. Р. Кудоярова¹, Л. Б. Высоцкая^{1,*}

¹Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН
450054 Уфа, просп. Октября, 71, Россия

*E-mail: vysotskaya@anrb.ru

Изучили влияние метаболизирующих абсцизовую кислоту (АБК) бактериальных штаммов родов *Pseudomonas* и *Arthrobacter* на содержание гормона в побегах и корнях растений пшеницы, а также в песчаном субстрате при плотной посадке. Обнаружена способность бактерий уже через 10 сут после инокуляции, хотя и в разной степени, снижать содержание АБК в среде выращивания и в растениях. При этом для большинства изученных штаммов было характерным снижение в побегах и реже наблюдало уменьшение количества АБК в корнях. Обнаруженное одновременное существенное снижение гормона в побегах и в песчаном субстрате, проявившееся при воздействии штаммов *P. plecoglossicida* 2.4-D, *P. frederiksbergensis* IB Ta10m, *P. veronii* IB K11-1, сопровождалось максимальным увеличением массы растений пшеницы по сравнению с неинокулированными растениями. Изученные бактерии в разной степени стимулировали накопление массы побега и корня, а также площади листьев, что, вероятно, могло быть связано с их различной способностью синтезировать другие гормоны, например ИУК, и/или воздействовать на гормональную систему самого растения. Обсуждается перспективность использования бактерий АБК-деструкторов для разработки сельскохозяйственных биопрепараторов, способных смягчать негативные последствия загущенного посева и повышать устойчивость к другим абиотическим факторам.

Ключевые слова: *Triticum durum*, плотность посадки, рост, абсцизовая кислота, рострегулирующие бактерии, АБК-деструкторы.

DOI: 10.31857/S0002188124120096, **EDN:** VURSCH

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение высокотехнологичных методов ведения сельского хозяйства включает рациональное использование пахотных земель. Оптимальная плотность посева растений – один из факторов получения стабильно высоких урожаев. Хотя суммарная урожайность всех растений в определенных пределах увеличивается при повышении плотности их посадки, урожайность отдельных растений снижается [1–4]. Это связано с конкуренцией растений за почвенные ресурсы, необходимые для эффективного использования световой энергии и формирования урожая при повышении плотности посева. Несколько текущих десятилетий в связи с конкуренцией активно изучали негативно влияющие на фотосинтез и урожай изменения морфогенетически-активного излучения,

характеризующегося изменением соотношения красного и дальнего красного света [5]. Несмотря на очевидную перспективность этого направления, особенно для зерновых культур, манипуляции с фитохромной системой оказались неэффективными и пока не дали практических результатов. В то же время накоплено немало сведений относительно роли фитогормонов в реакции растений на затенение [6]. И хотя в этой связи абсцизовой кислоте (АБК) уделялось немного внимания, и роль ее была неочевидной, получены сведения, что она участвует в реакции на световые сигналы [7–9].

В последнее время стало ясно, что растения проявляют реакции на присутствие соседей еще до нехватки питания и до затенения, связанные с водным обменом, прежде всего, с закрытием устьиц, и демонстрируют подавление роста. Эти ранние реакции предвещают будущую конкуренцию за основные ресурсы. Получены также сведения, что при увеличении

¹Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-26-00104.

плотности посадки по меньшей мере у растений салата в побегах довольно быстро накапливается АБК [10], которая может влиять на апертуру устьиц и показатели фотосинтеза [11, 12]. К тому же известно, что растения через корни выделяют этот гормон во внешнюю среду, в результате чего высокие почвенные концентрации абсцизовой кислоты могут негативно влиять на сами растения [13]. Таким образом, в условиях конкуренции, когда растению постоянно необходимо интегрировать одновременно множество сигналов окружающей среды [6], роль АБК может быть одной из определяющих в проявлении ранних реакций на присутствие соседних растений. В этой связи метод регуляции содержания АБК в растениях путем применения недавно описанных бактерий, способных к деградации этого фитогормона [14], мог бы оказаться весьма перспективным для более мягкого прохождения стресса в умеренно загущенных посевах. Важно также контролировать содержание АБК в почве, которая в условиях более плотной посадки может выступать в качестве корневого сигнала, приводящего к ингибированию роста растений [11]. В настоящее время сведения о бактериях, способных метаболизировать АБК, весьма ограничены, буквально известно о нескольких деструкторах АБК, которые снижали содержание этого гормона в растениях и позитивно влияли на их рост [14–16]. Поиск новых штаммов и изучение механизмов их влияния на сельскохозяйственные культуры необходим для получения комплексных эффективных рострегулирующих препаратов, повышающих устойчивость и урожайность сельскохозяйственных культур в условиях умеренного биотического и абиотического стресса. Цель работы – изучение влияния предварительно отобранных бактериальных штаммов родов *Pseudomonas* и *Arthrobacter* [17], способных метаболизировать АБК, на рост растений пшеницы в условиях высокой плотности их посадки.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служили растения твердой пшеницы *Triticum durum* Desf., сорта Башкирская 27. Эксперименты проводили на светоплощадке с освещенностью 450 мкмоль/м²/с ФАР, 14-часовым световым периодом, влажностью воздуха 30–50% ОСВ. Плотность посадки растений имитировали разным количеством растений в одном вегетационном сосуде с 0.7 кг стерильного песчаного субстрата, пропитанного питательным раствором Хогланда–Арнона (Х–А). Семена пшеницы после стерилизации смесью этанола с пероксидом водорода проращивали в стерильных чашках Петри. Двухсуточные проростки высаживали в вегетационные сосуды по 5, 10 и 20 шт. в один сосуд.

Растения в течение эксперимента поливали один раз в сутки, в качестве подкормки вносили равные

объемы питательного раствора Х–А, после чего в каждый горшок по весу добавляли воду, в зависимости от транспирационных потерь, до влажности субстрата 80% ПВ. При таком режиме полива влажность субстрата в горшках изменялась в пределах от 80 (после полива) до 50% (перед поливом) ПВ и не предполагала воздействия на растения водного дефицита.

Штаммы использованных для обработки микроорганизмов в основном из рода *Pseudomonas* (*P. plecoglossica* 2.4-D (KY593189.1), описанные ранее [16, 18], *Pseudomonas* sp. IB TaE2 (PP316703), *P. frederiksbergensis* IB Ta10m (PP316701), *P. veronii* IB K11-1 (PP237770)) и *Arthrobacter* sp. ТаЖ-5 находятся в коллекции Уфимского института биологии УФИЦ РАН [17].

Инокуляцию растений бактериями проводили в день посадки проростков путем внесения в прикорневую зону суспензии отмытых бактериальных клеток до конечной концентрации 10⁸ КОЕ/г субстрата. Бактериальные суспензии получали, выращивая штаммы на средах Кинг Б – род *Pseudomonas* и мясо-пептонный бульон – *Arthrobacte*, как это описано ранее [17, 19].

Для определения содержания абсцизовой кислоты в растительных образцах использовали твердофазный иммуноферментный анализ (ТФИФА), который основан на применении специфичных антител к гормонам. Надежность этого метода обеспечивается не только специфичностью антител, но и оригинальным способом очистки АБК с помощью модифицированного метода экстракции, основанного на уменьшении объема экстрагента на каждом этапе экстракции и реэкстракции, позволяющего уменьшить уровень сопутствующих компонентов [20]. Достоверность ТФИФА гормонов подтверждена путем сопоставления его результатов с данными физико-химического анализа (сочетания хроматографии с масс-спектрометрией) [21, 22].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При выращивании проростков пшеницы в вегетационном сосуде через 13 сут максимально плотная посадка (20 растений/сосуд) приводила к заметному снижению массы одного растения по сравнению с растущими по 5 шт./сосуд (рис. 1).

Растения проявляли признаки недостатка питания, демонстрируя повышение соотношения масс корень/ побег, снижение индекса азотного баланса растений (*NBI*), снижение содержания хлорофилла по сравнению с растениями с меньшим количеством в сосудах (по 5 и 10 растений) (рис. 2). *NBI* является показателем изменения соотношения С : N в листьях и может служить индикатором азотного статуса растений.

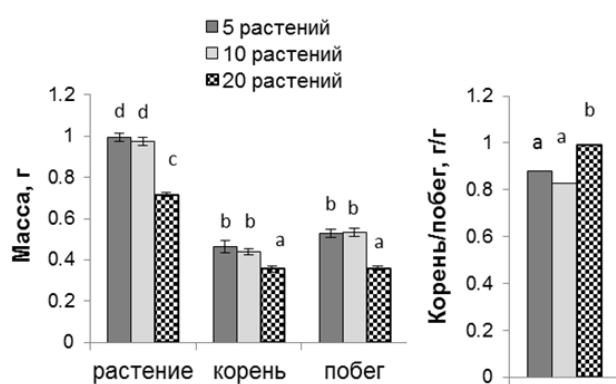


Рис. 1. Масса целого растения, побега и корня, соотношение масс корень/побег растений пшеницы через 13 сут после посадки 5-, 10- и 20-ти проростков в один вегетационный сосуд. Разными буквами обозначены достоверно отличающиеся величины ($n = 30$, $P \leq 0.05$, ANOVA, тест Дункана). То же на рис. 2–5.

Подобранные способ посадки и режим внесения почвенных ресурсов (вода, минеральные соли) позволили выявить зависимость реакции растений от их количества в сосуде и определить, что в течение первых 2-х нед проявлялись негативные последствия конкуренции при выращивании 20-ти растений/сосуд (при высокой плотности посадки), соответственно эта плотность и была выбрана для дальнейшего исследования.

Обработка растений пшеницы, растущих в плотном посеве (20 растений/сосуд) суспензией бактериальных клеток *P. plecoglossicida* 2.4-D, *Pseudomonas* sp. IB TaE2, *P. frederiksbergensis* IB Ta10m, *P. veronii* IB K11-1 и *Arthrobacter* sp. ТаЖ-5, которые являются деструкторами АБК, в большинстве случаев приводила к снижению содержания гормона в песчаном субстрате, в котором выращивали растения, уменьшая концентрацию на 24–37% по сравнению с неинокулированным контролем (рис. 3).

При воздействии *Pseudomonas* sp. IB TaE2 снижение было недостоверным, хотя *in vitro* в минерально-солевой среде бактерия проявляла способность разрушать АБК. Численность ее увеличивалась в присутствии гормона как единственного источника углерода и энергии [17]. Внесение АБК-разрушающих бактерий в прикорневую зону приводило к снижению содержания этого гормона в побегах всех обработанных проростков пшеницы на 34–60%, и только один инокуляйт *P. veronii* IB K11-1 существенно снижал (на 44%) концентрацию АБК в корнях.

Как показано ранее, АБК можно обнаружить в прилегающей к корням почве разных сельскохозяйственных культур. Со временем содержание ее может меняться, что и было продемонстрировано с помощью радиоактивной метки [13]. Поскольку считается, что между содержанием гормонов в почве и в растении должно в конечном счете достигаться равновесие, обнаруженное нами снижение концентрации гормона в инокулированных растениях могло быть таким проявлением.

Также выявлены особенности влияния штаммов *P. frederiksbergensis* IB Ta10m, *P. veronii* IB K11-1, которые снижали содержание АБК в корнях, в дополнение к снижению ее содержания в побегах. При этом для всех инокулятов было характерно, хотя и в разной степени, увеличение массы побега по сравнению с неинокулированными растениями (рис. 4).

Максимальная масса была отмечена как у целого растения, так и у корня при обработке *P. frederiksbergensis* IB Ta10m и *P. veronii* IB K11-1. Соответственно, все изученные деструкторы АБК позитивно влияли на рост растений пшеницы при выбранной высокой плотности посадки.

Штамм *Pseudomonas* sp. IB TaE2 был малоэффективен для стимуляции прорастания семян и поддержания роста проростков пшеницы в чашках Петри [17]

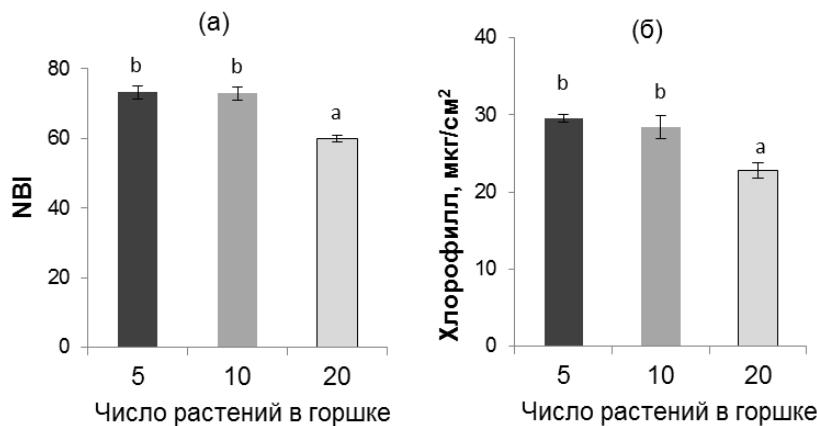


Рис. 2. Индекс азотного баланса *NBI* (а) и содержание хлорофилла (б) растений пшеницы через 13 сут после посадки 5-, 10- и 20-ти проростков в один вегетационный сосуд.

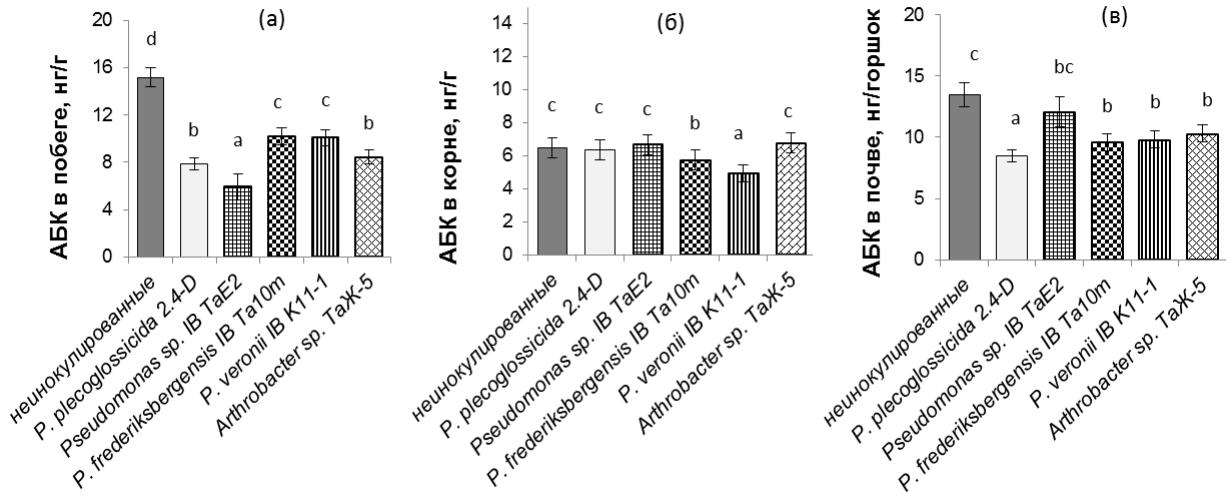


Рис. 3. Содержание АБК в побегах и корнях (нг/г сырой массы) растений пшеницы и в почве (нг/сосуд) через 10 сут после посадки проростков в сосуд и внесения в ризосферу (до 10^8 КОЕ/г субстрата) деструкторов АБК ($n = 9$).

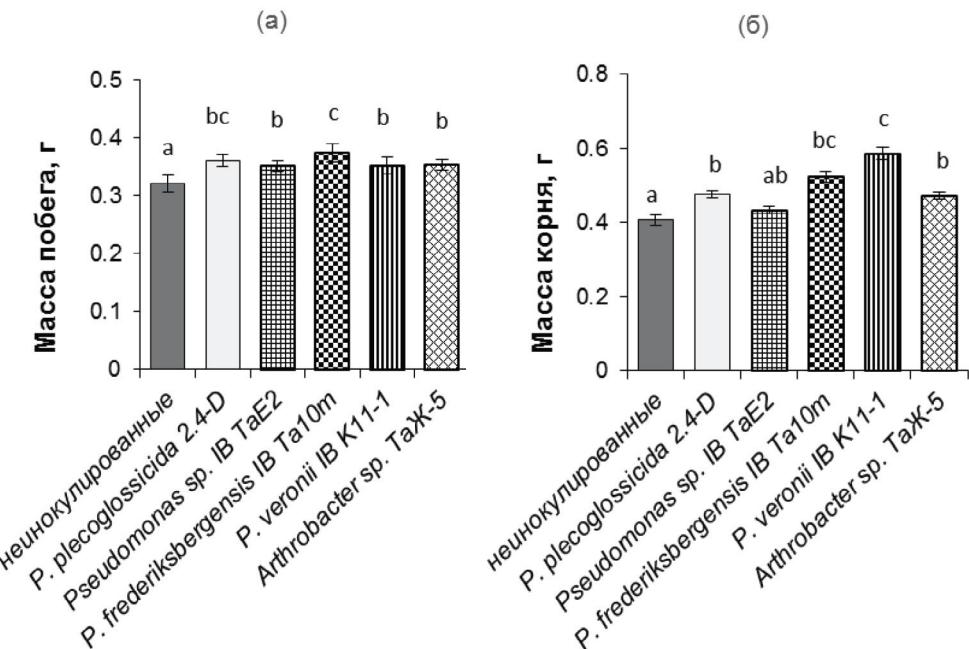


Рис. 4. Масса побегов (а) и корней (б) через 10 сут после посадки проростков пшеницы и внесения в ризосферу (до 10^8 КОЕ/г субстрата) деструкторов АБК ($n = 12$).

и в данных экспериментах также незначительно увеличивал массу растений (на 6–9% по сравнению с неинокулированными). Несмотря на снижение концентрации АБК в побеге, которое было максимальным по сравнению с другими бактериями, данный штамм не вызывал достоверного снижения содержания гормона в почве. Как показано еще в классических работах, корневые сигналы АБК (концентрация АБК в ксилеме) влияют на транспирацию и рост растений в определенной ситуации в большей степени, чем содержание гормона в ткани листа [13]. Кроме того, АБК может подавлять рост и ветвление корней [23, 24], что должно отрицательно сказать

на способности корневой системы поглощать воду и элементы минерального питания. Поскольку в наших опытах содержание АБК снижалось, можно это рассматривать как механизм положительного действия микробов.

Наибольшее увеличение массы растения было характерно для *P. plecoglossicida* 2.4-D, *P. frederiksbergensis* IB Ta10m, *P. veronii* IB K11-1, обработка которыми снижала содержание АБК в почве и побегах растений. Бактерия *P. plecoglossicida* 2.4-D в равной степени стимулировала рост побега и корня, а *P. veronii* IB K11-1 максимально активировала накопление

массы корня на фоне снижения в нем содержания АБК. Соответственно, разным сочетаниям изменений содержания АБК, обнаруженным в почве, корне и побеге, соответствовали разные ростовые ответы проростков пшеницы. Это аргумент в пользу того, что влияние бактерий АБК-деструкторов определяло ростовой ответ растений, учитывая, что выращивали их при одинаковом температурном, водном режиме и снабжали одинаковым количеством питательных элементов. Интересно то, что инокулированные растения, за исключением обработанных *Pseudomonas* sp. IB TaE2, в течение первой недели после обработки демонстрировали более высокие показатели азотного индекса, свидетельствующего об обеспеченности растений минеральным питанием (табл. 1).

Бактериальная обработка не влияла на содержание хлорофилла в пределах наших сроков выращивания

растений в плотной посадке, что было также характерно и для конкурирующих растений салата [25].

Конкурентные отношения между растениями в плотных посадках предполагают ростовой ответ листьев, направленный на захват солнечной энергии, которая в загущенных посевах становится лимитирующим фактором [26]. Возможно поэтому поддержание роста растений в плотных посевах в результате обработки их бактериями-деструкторами АБК не должно ограничиваться увеличением массы побега или корня. В этой связи проанализировали формирование площади листовой поверхности растений пшеницы после инокуляции разными бактериями (рис. 5).

Показано, что бактериальная обработка в разной степени стимулировала увеличение площади листьев в зависимости от штамма. Максимальные величины этого показателя были характерны для

Таблица 1. Динамика содержания хлорофилла (Chl) и индекса азотного баланса (*NBI*) в проростках пшеницы после инокуляции клетками бактерий до 10^8 КОЕ/г субстрата, $n = 30$

Вариант обработки	Время после инокуляции, сут					
	3		6		10	
	Chl	<i>NBI</i>	Chl	<i>NBI</i>	Chl	<i>NBI</i>
Неинокулированные	17 ±	38 ±	23 ±	64 ±	23 ±	63 ±
<i>P. plecoglossicida</i> 2.4-D	17 ±	44 ±	23 ±	71 ±	23 ±	65 ±
<i>Pseudomonas</i> sp. IB TaE2	17 ±	39 ±	22 ±	61 ±	22 ±	58 ±
<i>P. frederiksbergensis</i> IB Ta10m	16 ±	40 ±	23 ±	68 ±	23 ±	62 ±
<i>P. veronii</i> IB K11-1	17 ±	44 ±	22 ±	66 ±	24 ±	63 ±
<i>Arthrobacter</i> sp. Таж-5	16 ±	40 ±	22 ±	65 ±	23 ±	62 ±

Примечание. *NBI* – усл. ед., Chl – мкг/см².

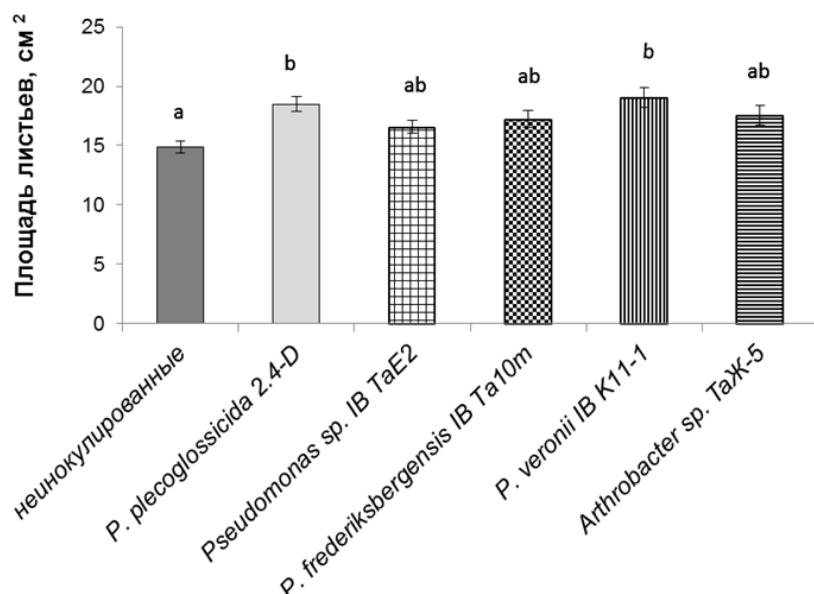


Рис. 5. Суммарная площадь листьев растений пшеницы через 10 сут после посадки и внесения в ризосферу (до 10^8 КОЕ/г субстрата) деструкторов АБК ($n = 12$).

P. plecoglossicida 2.4-D и *P. veronii* IB K11–1, а у штамма *P. frederiksbergensis* IB Ta10m, для которого также была характерна стимуляция накопления массы растением, эта реакция практически отсутствовала. Возможно, формирование большего листового покрытия у растений пшеницы под воздействием бактерий *P. plecoglossicida* 2.4-D и *P. veronii* IB K11-1 было связано с их способностью к синтезу и выделению во внешнюю среду ауксина [27, 28], участие которого подтверждено в реакции растений на затенение [10, 29]. Несмотря на то, что в литературе сведения о разрушающих АБК бактериальных штаммах ограничиваются несколькими представителями [14], известно, что они позитивно влияли на рост растений, снижая в них эндогенное содержание АБК, но отличались по способности синтезировать другие гормоны и метаболиты [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучение особенностей роста простокров пшеницы и содержания в них АБК и в почвенном растворе в ответ на обработку АБК-деструкторами подтвердило наличие связи между способностью бактерий к снижению содержания АБК и стимуляцией или поддержанием ростовых процессов в плотных посадках. Выявленные особенности ответных реакций растения на обработку отдельными метаболизирующими АБК бактериями предположительно были также связаны с влиянием бактерий на другие гормоны растений или с прямым воздействием бактериальных метаболитов на растения. Таким образом, удалось выявить несколько перспективных для дальнейших исследований бактериальных штаммов-деструкторов АБК, относящихся к роду *Pseudomonas* (*P. plecoglossicida* 2.4-D, *P. frederiksbergensis* IB Ta10m, *P. veronii* IB K11-1), применение которых могло бы способствовать поддержанию роста и смягчению стресса у растений пшеницы в загущенных посевах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fang X.Li.Y., Nie J., Wang C., Huang K., Zhang K.Y., Zhang Y., She H., Xi L., Ruan R., Yuan X., Yi Z. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the leaf photo-synthetic characteristics, agronomic traits and grain yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) // Field Crops Res. 2018. № 219. P. 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.001>
2. Jiang X., Tong L., Kang S., Li F., Li D., Qin Y., Shi R., Li J. Planting density affected biomass and grain yield of maize for seed production in an arid region of Northwest China // J. Arid Land. 2018. № 10. P. 292–303. <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0098-7>
3. Zhang Y., Xu Z., Jun L., Wang R. Optimum planting density improves resource use efficiency and yield stability of rainfed maize in semiarid climate // Front. Plant Sci. 2021. № 12. P. 752606. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.752606>
4. Romero H., Guataquira S., Forero D. Light interception, photosynthetic performance, and yield of oil palm interspecific OxG hybrid (*Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés × *Elaeis guineensis* Jacq.) under three planting densities // Plants. 2022. № 11. P. 1166. <https://doi.org/10.3390/plants11091166>
5. Ballaré C., Pierik R. The shade-avoidance syndrome: Multiple signals and ecological consequences // Plant Cell Environ. 2017. V. 40. P. 2530–2543. <https://doi.org/10.1111/pce.12914>
6. Tang Y.J., Liesche J. The molecular mechanism of shade avoidance in crops – How data from *Arabidopsis* can help to identify targets for increasing yield and biomass production // J. Integr. Agric. 2017. V. 16. P. 1244–1255. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61434-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61434-X)
7. Cagnola J.I., Ploschuk E., Benech-Arnold T., Finlayson S.A., Casal J.J. Stem transcriptome reveals mechanisms to reduce the energetic cost of shade-avoidance responses in tomato // Plant Physiol. 2012. V. 160. P. 1110–1119. <https://doi.org/10.1104/pp.112.201921>
8. Reddy S., Holalu S., Casal J., Finlayson S. Abscisic acid regulates axillary bud outgrowth responses to the ratio of red to far-red light // Plant Physiol. 2013. V. 163. P. 1047–1058. <https://doi.org/10.1104/pp.113.221895>
9. Hayes S., Pantazopoulou C.K., van Gelderen K., Reinen E., Tween A.L., Sharma A., de Vries M., Prat S., Schuurink R.C., Testerink C., Pierik R. Salinity limits plant shade avoidance // Curr. Biol. 2019. V. 29. P. 1669–1676. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.03.042>
10. Vysotskaya L., Arkhipova T., Kudoyarova G., Veselov S. Dependence of growth inhibiting action of increased planting density on capacity of lettuce plants to synthesize ABA // J. Plant Physiol. 2018. V. 220. P. 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.09.011>
11. Munemasa S., Hauser F., Park J., Waadt R., Brandt B., Schroeder J.I. Mechanisms of abscisic acid-mediated control of stomatal aperture // Curr. Opin. Plant Biol. 2015. V. 28. P. 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.10.010>
12. Chen K., Li G.J., Bressan R.A., Song C., Song C.P., Zhu J.K., Zhao Y. Abscisic acid dynamics, signaling, and functions in plants // J. Integr. Plant. Biol. 2020. V. 62. P. 25–54. <https://doi.org/10.1111/jipb.12899>
13. Hartung W., Sauter A., Turner N.C., Fillery I., Heilmeyer H. Abscisic acid in soils: What is its function and which factors and mechanisms influence its concentration? // Plant Soil. 1996. V. 184. P. 105–110. <https://doi.org/10.1007/BF00029279>

14. Сырова Д.С., Шапошников А.И., Юзихин О.С., Белимов А.А. Деструкция и трансформация фитогормонов микроорганизмами // Прикл. биохим. и микробиол. 2022. Т. 58. № 1. С. 3–22.
<https://doi.org/10.30906/0023-1134-2021-55-7-60-64>
15. Belimov A., Dodd I., Safronova V., Dumova V., Shaposhnikov A., Ladatko A., Davies W. Abscisic acid metabolizing rhizobacteria decrease ABA concentrations in planta and alter plant growth // Plant Physiol. Biochem. 2014. V. 74. P. 84–91.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.10.032>
16. Vysotskaya L., Martynenko E., Ryabova A., Kuzmina L., Starikov S., Chetverikov S., Gaffarova E., Kudoyarova G. The growth-inhibitory effect of increased planting density can be reduced by abscisic acid-degrading bacteria // Biomolecules. 2023. V. 13. P. 1668.
<https://doi.org/10.3390/biom13111668>
17. Рябова А.С., Кузьмина Л.Ю., Мартыненко Е.В., Четвериков С.П., Мильман П.Ю., Высоцкая Л.Б. Выявление штаммов-деструкторов АБК и их влияние на всхожесть семян и рост проростков пшеницы // Экобиотехнология. 2023. Т. 6. № 3. С. 190–199
<https://doi.org/10.31163/2618-964X-2023-6-3-190-199>
18. Chetverikov S.P., Sharipov D.A., Korshunova T.Y., Loginov O.N. Degradation of perfluorooctanyl sulfonate by strain *Pseudomonas plecoglossicida* 2.4-D // Appl. Biochem. Microbiol. 2017. V. 53. P. 533–538.
<https://doi.org/10.1134/S0003683817050027>
19. King E.O., Ward M.K., Raney D.E. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescin // J. Lab. Clin. Med. 1954. V. 44. P. 301–307.
<https://doi.org/10.5555/uri:pii:002221435490222X>
20. Veselov S.Yu., Kudoyarova G.R., Egutkin N.L., Gyuli-Zade V.G., Mustafina A.R., Kof E.K. Modified solvent partitioning scheme providing increased specificity and rapidity of immunoassay for indole 3-acetic acid // Physiol. Plantarum. 1992. V. 86. P. 93–96.
21. Kudoyarova G.R., Melentiev A.I., Martynenko E.V., Arkhipova T.N., Shendel G.V., Kuz'mina L.Yu., Dodd I.C., Veselov S.Yu. Cytokinin producing bacteria stimulate amino acid deposition by wheat roots // Plant Physiol. Biochem. 2014. V. 83. P. 285–291.
22. Veselov S.Yu., Timergalina L.N., Akhiyarova G.R., Kudoyarova G.R., Korobova A.V., Ivanov I.I., Arkhipova T.N., Prinsen E. Study of cytokinin transport from shoots to roots of wheat plants is informed by a novel method of differential localization of free cytokinins bases or their ribosylated forms by means of their specific fixation // Protoplasma. 2018. V. 255. P. 1581–1594.
<https://doi.org/10.1007/s00709-018-1248-7>
23. Sun L.R., Wang Y.B., He S.B., Hao F.S. Mechanisms for abscisic acid inhibition of primary root growth // Plant Signal. Behav. 2018. V. 13. e1500069.
<https://doi.org/10.1080/15592324.2018.1500069>
24. Akhiyarova G., Veselov D., Ivanov R., Sharipova G., Ivanov I., Dodd I.C., Kudoyarova G. Root ABA accumulation delays lateral root emergence in osmotically stressed barley plants by decreasing root primordial IAA accumulation // Inter. J. Plant Biol. 2023. V. 14. P. 77–90.
<https://doi.org/10.3390/ijpb14010007>
25. Vysotskaya L., Martynenko E., Ryabova A., Kuzmina L., Starikov S., Chetverikov S., Gaffarova E., Kudoyarova G. The growth-inhibitory effect of increased planting density can be reduced by abscisic acid-degrading bacteria // Biomolecules. 2023. V. 13. P. 1668.
<https://doi.org/10.3390/biom13111668>
26. Yun-jia T., Liesche J. The molecular mechanism of shade avoidance in crops-How data from *Arabidopsis* can help to identify targets for increasing yield and biomass production // J. Integr. Agric. 2017. V. 16(6). P. 1244–1255.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61434-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61434-X)
27. Кузьмина Л.Ю., Высоцкая Л.Б., Галимзянова Н.Ф., Гильванова Е.А., Рябова А.С., Мелентьев А.И. Новые штаммы фосфатомобилизующих бактерий, производящих ауксин, перспективные для сельскохозяйственной биотехнологии // Изв. УНЦ РАН. 2015. № 1. С. 40–46.
28. Bakaeva M., Kuzina E., Vysotskaya L., Kudoyarova G., Arkhipova T., Rafikova G., Chetverikov S., Korshunova T., Chetverikova D., Loginov O. Capacity of pseudomonas strains to degrade hydrocarbons, produce auxins and maintain plant growth under normal conditions and in the presence of petroleum contaminants // Plants. 2020. V. 9. P. 379.
<https://doi.org/10.3390/plants9030379>
29. Pierik R., Ballare C.L. Control of plant growth and defense by photoreceptors: From mechanisms to opportunities in agriculture // Mol. Plant. 2021. V. 14. P. 61–76.
<https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.11.021>

Influence of ABA-Metabolizing Bacteria on the Growth and ABA Content in Wheat Plants and Soil in Dense Planting

E. V. Martynenko^a, L. Yu. Kuzmina^a, E. R. Gaffarova^a, A.S. Ryabova^a, G. R. Kudoyarova^a,
L. B. Vysotskaya^{a, #}

^a*Ufa Institute of Biology—Ufa Federal Research Center of the RAS,
prosp. Oktyabrya 71, Ufa 450054, Russia
#E-mail: vysotskaya@anrb.ru*

The influence of abscisic acid (ABA)-metabolizing bacterial strains of the genera *Pseudomonas* and *Arthrobacter* on the hormone content in the shoots and roots of wheat plants, as well as in a sandy substrate during dense planting, has been studied. The ability of bacteria to reduce the ABA content in the growing environments and in plants, albeit to varying degrees, was discovered already 10 days after inoculation. At the same time, most of the studied strains were characterized by decrease of ABA in shoots, and suppression of ABA in the roots was observed less frequently. The simultaneous decrease in the hormone in the shoots and in the sandy substrate, which manifested itself under the influence of strains *P. plecoglossicida* 2.4-D, *P. frederiksbergensis* IB Ta10m, *P. veronii* IB K11-1, was accompanied by a maximum increase of wheat weight plants as compared to non-inoculated plants. The studied bacteria to varying degrees stimulated the accumulation of shoot and root mass, as well as leaf area, which could probably be associated with their different ability to synthesize other hormones, such as IAA, and/or influence the hormonal system of the plant itself. The prospects of using ABA-destructor bacteria for the development of agricultural biological products that can mitigate the negative effects of thickened crops and increase resistance to other abiotic factors are discussed.

Keywords: *Triticum durum*, planting density, growth, ABA, plant growth-promoting bacteria, ABA-destructors.