



ЭКОБИОТЕХ

ISSN 2618-964X

<http://ecobiotex-journal.ru>



УДК 631.811.982:581.14:581.11:633.11

UDC 631.811.982:581.14:581.11:633.11

КОНЦЕНТРАЦИЯ КАЛЬЦИЯ И ЖЕЛЕЗА В РАСТЕНИЯХ ПШЕНИЦЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОЯСКОВ КАСПАРИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЗАСОЛЕНИЯ И РОСТСТИМУЛИРУЮЩИХ БАКТЕРИЙ

Белимов А.А.^{*1}, Мартыненко Е.В.²,
Архипова Т.Н.², Галин И.Р.²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, Пушкин, Россия
² Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия
*E-mail: belimov@rambler.ru

Как засоление, так и инокуляция бактерий в ризосферу могут отрицательно сказаться на поглощении растением элементов минерального питания, способствуя усилению формирования апопластных барьеров. В данном исследовании предпринята попытка изучить влияние засоления и инокуляции растений пшеницы ростстимулирующими бактериями *Pseudomonas mandelii* IB-Ki14 и *Bacillus subtilis* IB22 на формирование поясков Каспари и концентрацию важных для растений ионов кальция и железа. Под влиянием засоления отмечалась стимуляция формирования апопластных барьеров в корнях. При инокуляции бактериями как при воздействии хлорида натрия, так и без него, наиболее заметным было усиление формирования поясков Каспари под воздействием штамма *P. mandelii* IB-Ki14. Как засоление, так и бактериализация растений пшеницы оказывала влияние на содержание в них кальция и железа. Некоторые из этих эффектов (снижение уровня кальция в побегах под влиянием штамма *P. mandelii* IB-Ki14 на фоне засоления, а также изменение в распределении кальция и железа между побегом и корнем при засолении) можно объяснить усилением апопластных барьеров. Однако связь между изменением уровня этих элементов и формированием апопластных барьеров удавалось проследить не во всех случаях. Обсуждается в качестве возможного механизма зависимость изменения уровня кальция и железа от влияния засоления и бактерий на активность транспортеров ионов и способности бактерий продуцировать сидерофоры.

Ключевые слова: PGPR ♦ пшеница ♦ засоление ♦ пояски Каспари ♦ содержание кальция и железа

Поступила в редакцию: 10.03.2025

[Цитировать | Cite as](#)

THE CONCENTRATION OF CALCIUM AND IRON IN WHEAT PLANTS DURING THE FORMATION OF CASPARIAN STRIPS UNDER THE INFLUENCE OF SALINIZATION AND GROWTH-STIMULATING BACTERIA

Belimov A.A.^{*1}, Martynenko E.V.²,
Arkhipova T.N.², Galin I.R.²

¹ All-Russian Research Institute for Agricultural Microbiology RAAS, Pushkin, St.-Petersburg, Russia
² Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia
*E-mail: belimov@rambler.ru

Both salinity and bacterial inoculation into the rhizosphere can negatively affect the uptake of mineral nutrients by plants, promoting the formation of apoplastic barriers. In this study, an attempt was made to study the effect of salinity and inoculation of wheat plants with growth-promoting bacteria *Pseudomonas mandelii* IB-Ki14 and *Bacillus subtilis* IB22 on the formation of Casparian bands and the concentration of calcium and iron ions important for plants. Under the influence of salinity, stimulation of the formation of apoplastic barriers in the roots was noted. When inoculated with bacteria both with and without the effect of sodium chloride, the most noticeable was the enhancement of the formation of Casparian bands under the influence of the *P. mandelii* IB-Ki14 strain. Both salinity and bacterization of wheat plants affected the content of calcium and iron in them. Some of these effects (reduction of calcium level in shoots under the influence of *P. mandelii* IB-Ki14 strain against the background of salinity, as well as changes in the distribution of calcium and iron between the shoot and root under salinity) can be explained by the strengthening of apoplastic barriers. However, the relationship between the change in the level of these elements and the formation of apoplastic barriers could not be traced in all cases. The dependence of the change in the level of calcium and iron on the effect of salinity and bacteria on the activity of ion transporters and the ability of bacteria to produce siderophores is discussed as a possible mechanism.

Keywords: PGPR ♦ wheat ♦ salinity ♦ Casparian bands ♦ calcium and iron content

Принято в печать: 24.03.2025

DOI: [10.31163/2618-964X/2025-9](https://doi.org/10.31163/2618-964X/2025-9)

EDN: TXHNNO

ВВЕДЕНИЕ

Отложение суберина и лигнина в области эндодермы является важным механизмом, обеспечивающим солеустойчивость растений за счет снижения неконтролируемого притока токсичных ионов натрия в растения по апопласту [Chen et al., 2011]. Показано, что засоление ускоряет и усиливает отложение лигнина в области поясков Каспари и формирование ламелл суберина, что сопровождается снижением накопления натрия в растениях [Krishnamurthy et al., 2009]. Вместе с тем, блокирование транспорта веществ по апопласту может отрицательно сказаться на поглощении нужных для растения элементов минерального питания. Было показано, что усиление апопластных барьеров в области эндодермы под влиянием генетических модификаций, влияющих на синтез суберина и лигнина, вызывает изменения в концентрации ряда макро- и микроэлементов в растениях [Barberon, 2017]. При засолении укрепление апопластных барьеров могло быть одним из механизмов снижения уровня ионов калия, необходимых для нормального функционирования фотосинтеза, синтеза белка, осмотической регуляции и других важных процессов [Tränkner et al., 2018]. На формирование апопластных барьеров также может влиять инокуляция растений некоторыми бактериями. Ранее нами было показано, что усиление формирования поясков Каспари под влиянием засоления сопровождалось не только снижением накопления натрия, но также повышением содержания калия и фосфора в растениях пшеницы [Martynenko et al., 2022]. Обработка растений *Bacillus subtilis* IB22 также способствовала усилению апопластных барьеров, что снижало уровень накопления натрия при засолении и повышало уровень калия [Akhtyamova et al., 2023]. Представляло интерес изучить влияние засоления и инокуляции бактериями на содержание в растениях других элементов. В данной работе было изучено влияние этих воздействий на содержание в растениях пшеницы кальция и железа, являющихся важным макро- и микроэлементом, соответственно.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта использовали растения твердой яровой пшеницы *Triticum durum* Desf., сорт Башкирская 27. Для инокуляции растений брали грамположительные аэробные спорообразующие цитокининпродуцирующие бактерии *Bacillus subtilis* IB-22 (GenBank MT590663) [Arkhipova et al., 2005] и грамотрицательные ауксинпродуцирующие бактерии *Pseudomonas mandelii* IB-Ki14 (ВКМ В-3250) [Кузьмина и др., 2018] из коллекции микроорганизмов Уфимского института биологии УФИЦ РАН. Обе бактерии являются умеренными галофилами (5-7 % NaCl) [Кузьмина и др., 2018]. Бактериальные препараты получали культивированием штаммов на средах: *B. subtilis* IB-22 – на среде K1G [Кузьмина и др., 2015], *Pseudomonas mandelii* IB-Ki14 – на среде Кинг Б [King et al., 1954]. Штаммы микроорганизмов культивировали в колбах Эрленмейера с соответствующей питательной средой на шейкере (160 об/мин): бациллы – в течение 72 ч при температуре 37°C, грамотрицательные бактерии – 48 часов при 28°C.

Эксперименты проводились в лабораторных условиях. Растения выращивались в сосудах объемом 500 см³. Для обеспечения дренажа на дно помещали слой гравия и после установки стеклянной трубки для газообмена сосуды заполняли 0,45 кг сухой почвы (агрочернозем глинисто-иллювиальный, характеризующийся средней гумусированностью (6.3%), pH 5.9), содержащей 10% песка. За трое суток до начала эксперимента почву в сосудах насыщали либо водой, либо 100 мМ раствором NaCl до 100% от полной влагоемкости. Семена пшеницы стерилизовали, замачивая их в растворе 96% C₂H₅OH: 3% H₂O₂ (1:1, v/v) в течение 5

минут и затем многократно промывали дистиллированной водой. В каждый сосуд помещали 10 семян, одновременно внося в ризосферу по 1 мл бактериальной суспензии на семя (10^7 КОЕ/мл). Растения выращивали на светоплощадке с освещенностью $420 \text{ ммоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ PAR, 14-часовым фотопериодом при 24°C . В качестве контроля использовали сосуды с растениями, выращенными в почве без внесенных бактерий. Влажность почвы поддерживали на уровне 70% от полной влагоемкости поливом дистиллированной водой. Количество необходимой для полива воды рассчитывали ежедневным взвешиванием сосудов с растениями. На 14 сутки с начала эксперимента определяли сырую массу корней и побегов.

Микроскопия. Для обнаружения лигнина и суберина с помощью гемисульфата берберина [Musielak et al., 2015] из сегментов базальной части корней бритвой вручную делали поперечные срезы на шестой день после начала эксперимента. Их окрашивали водным раствором гемисульфата берберина (0,1% по массе) в течение 1 ч и промывали 2 раза дистиллированной водой. Срезы дополнительно окрашивали в течение 15 мин толуидиновым синим (0,05% м/о) в 0,1 М фосфатном буфере (pH 5,6), дважды промывали дистиллированной водой, заключали в смесь 0,1% FeCl_3 /50% глицерина и накрывали покровным стеклом. Флуоресценцию берберина возбуждали твердотельным лазером с длиной волны 488 нм с использованием конфокального лазерного сканирующего конфокального микроскопа Olympus FluoView FV3000 (Olympus, Япония).

Элементный анализ. Через 14 суток после инокуляции растений оценивали концентрацию ионов железа и кальция, в корнях и побегах (для анализа использовались 1-й и 2-й зрелые листья) растений пшеницы с помощью оптического эмиссионного спектрометра параллельного действия с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9000 (Shimadzu, Japan) как описано ранее [Belimov et al., 2020].

Статистика. Статистическую обработку данных проводили по стандартным программам MS Excel. В таблицах представлены средние значения и ошибки средних. Достоверность различий оценивали с помощью программы Statistica 10, используя критерий Дункана.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку задача нашей работы состояла в выявлении предполагаемой зависимости содержания элементов минерального питания от формирования апопластных барьеров, важно было проанализировать отложение лигнина и суберина в корнях растений. На рис. 1 свечение берберина, отражающее уровень суберина и лигнина, закодировано цветом. Зеленый цвет соответствует самому слабому свечению, переход к синему, красному и желтому цвету обозначает более интенсивное свечение, что говорит об усилении процесса лигнификации.

Как видно из рисунка 1А, в корнях контрольных растений, которые не подвергались воздействию как засоления, так и инокуляции бактериями, уровень свечения клеточных стенок ксилемы и эндодермы был низким (закодирован зеленым цветом), что свидетельствует о низком уровне дифференциации клеток в корнях изученных молодых проростков. Под влиянием штамма *Bacillus subtilis* IB22 на радиальных стенках отдельных клеток эндодермы появлялось синее окрашивание, что указывает на начало лигнификации и формирования поясков Каспари. Наиболее заметным было изменение характера свечения под влиянием штамма *Pseudomonas mandelii* IB-K14. По сравнению со срезами корней растений, обработанных штаммом *Bacillus subtilis* IB22, в варианте со штаммом псевдомонад возросло количество окрашенных синим радиальных стенок эндодермы. Кроме того, было заметно

увеличение толщины клеточных стенок в области эндодермы. Также синим/красным цветом были окрашены стенки ксилемных сосудов. Все это свидетельствует о формировании поясков Каспари и усилении отложения лигнина и суберина в эндодерме и сосудах под влиянием псевдомонад.

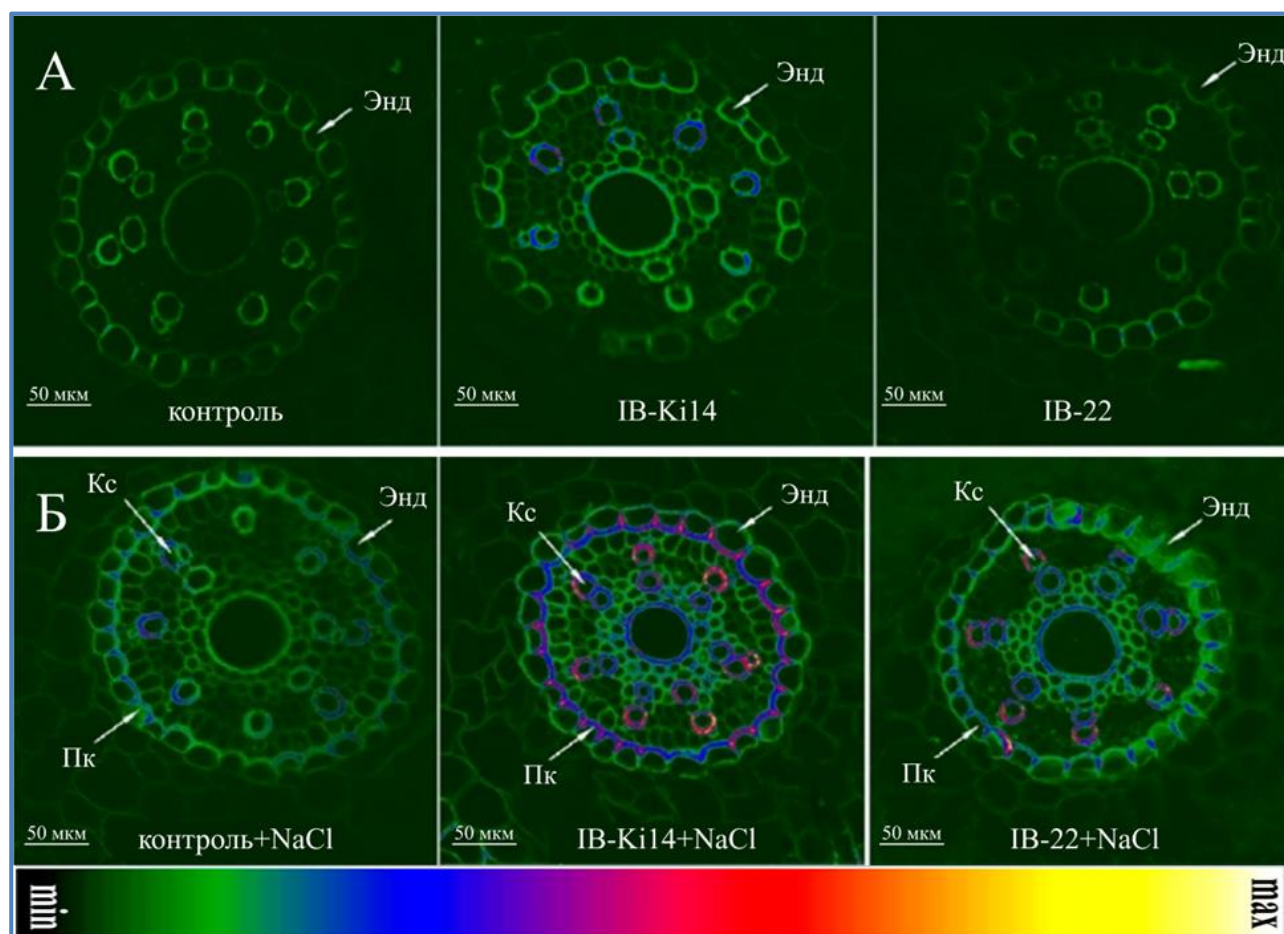


Рис. 1. Выявление лигнина и суберина по флуоресценции берберина на поперечных срезах базальной части корней пшеницы через шесть дней после бактериальной обработки *P. mandelii* IB-Ki14 или *B. subtilis* IB-22. (А) – без засоления, (Б) – при воздействии 100мМ раствора хлорида натрия. Энд – эндодерма; Пк – пояски Каспари; Кс – ксилема. Условное обозначение цветом интенсивности свечения (черный/зеленый – соответствует минимальному уровню содержания лигнина/суберина; желтый/белый – максимальному).

Засоление (в отсутствие бактериальной обработки) усиливало формирование апопластных барьеров, о чем свидетельствовала синяя окраска радиальных стенок эндодермы (Рис. 1Б). На фоне засоления под влиянием штамма *B. subtilis* IB22 появилась красная окраска в области сосудов и отдельных радиальных стенок эндодермы. Но самое заметное изменение свечения было выявлено на срезах корней, обработанных штаммом *P. mandelii* IB-Ki14: радиальные стенки эндодермы были окрашены красным, что указывает на усиление апопластных барьеров в области поясков Каспари. Таким образом, анализ результатов окрашивания срезов корней берберинном свидетельствует о стимуляции формирования апопластных барьеров под влиянием засоления. При инокуляции бактериями наиболее заметным было усиление свечения в случае инокуляции ризосферы штаммом *P. mandelii* IB-Ki14 как при воздействии 100мМ хлорида натрия, так и без него.

На фоне засоления элементный анализ выявил пониженное содержание кальция в побегах растений, инокулированных штаммом *P. mandelii* IB-Ki14 (Рис. 2).

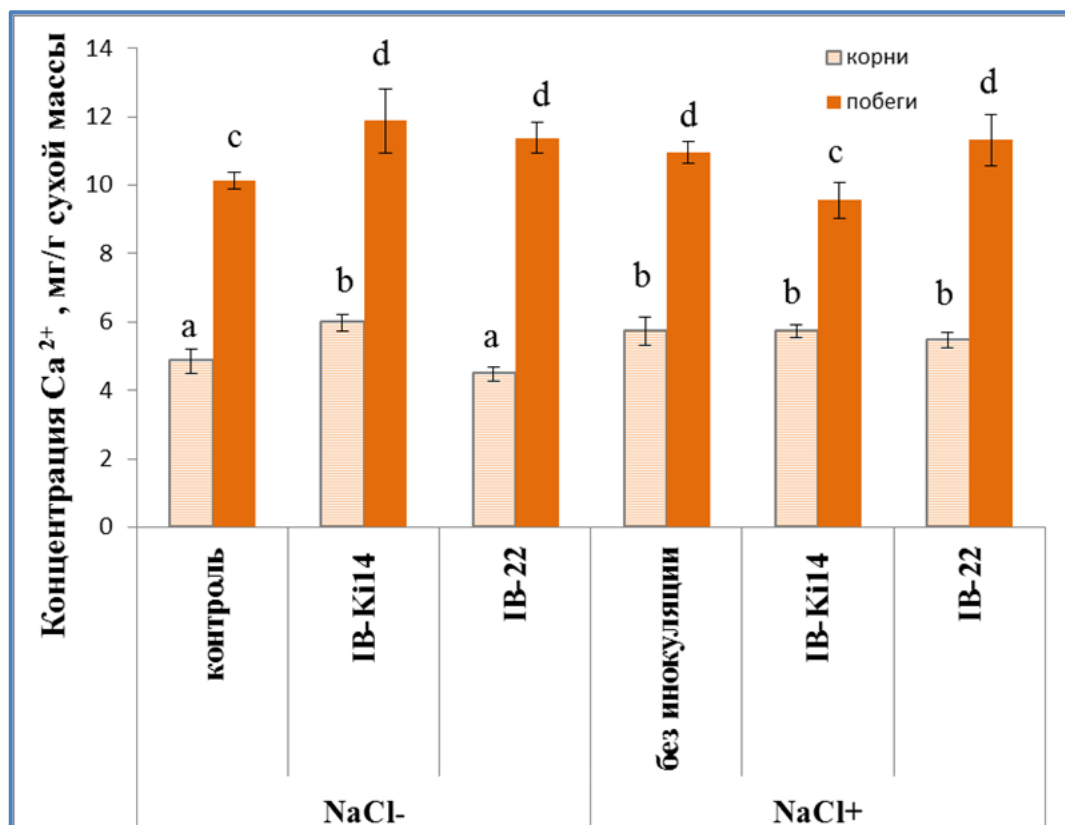


Рис.2 Концентрация ионов кальция в корнях и побегах растений пшеницы на 14 сутки после внесения гормонпродуцирующих бактерий в прикорневую среду растений. Достоверно отличающиеся значения обозначены разными буквами ($p < 0.05$, $n = 6$, тест Дункана).

Эти данные можно связать с тем фактом, что штамм *P. mandelii* IB-Ki14 в наибольшей степени стимулировал формирование апопластных барьеров. Полученные результаты соответствуют данным литературы о том, что усиление апопластных барьеров снижает уровень кальция в растениях и авторы рассматривают это как свидетельство значительного вклада апопластного транспорта в поглощение кальция растениями [Barberon, 2017]. Вместе с тем, не все полученные нами результаты можно было объяснить формированием апопластных барьеров. Так содержание кальция возрастало под влиянием засоления у неинокулированных растений (Рис. 2), в то время как в присутствии хлорида натрия формирование апопластных барьеров усиливалось (Рис. 1Б). Кроме того, в отсутствие засоления инокуляция ризосферы растений штаммом псевдомонад, напротив, увеличивала содержание кальция в корнях (Рис. 2), что происходило параллельно с усилением апопластных барьеров (Рис. 1А).

Известно, что радиальный транспорт ионов проходит не только по апопласту, но и по симпласту. Попадая в клетки с помощью переносчиков, ионы перемещаются по плазмодесмам от клетки к клетке, преодолевая апопластные барьеры поясков Каспари [Вутт et al., 2018]. Известно, что распознавание некоторых бактерий растением активирует поглощение кальция клетками корней [Tadrosova et al., 2024]. Вероятно, этот механизм мог обеспечить увеличение концентрации кальция в растениях под влиянием *P. mandelii* IB-Ki14, зарегистрированное в данной работе. Известно также, что засоление может активировать переносчики кальция в эпидерме корней [Laohavisit et al., 2013], чем можно объяснить повышение содержания кальция в корнях неинокулированных растений под влиянием засоления. Вместе с тем, в последнем случае можно заметить вклад усиления апопластных барьеров в распределение кальция между побегом и корнем. Этот эффект проявлялся в том,

что повышение содержания кальция в корнях инокулированных растений под влиянием засоления не приводило к накоплению этого элемента в побегах. Очевидно, усиленное формирование апопластных барьеров могло задержать поглощенный кальций в корнях.

При анализе распределения железа между побегом и корнем обращает на себя внимание, что его уровень в корнях был более чем на порядок выше, чем в побегах (Рис. 3).

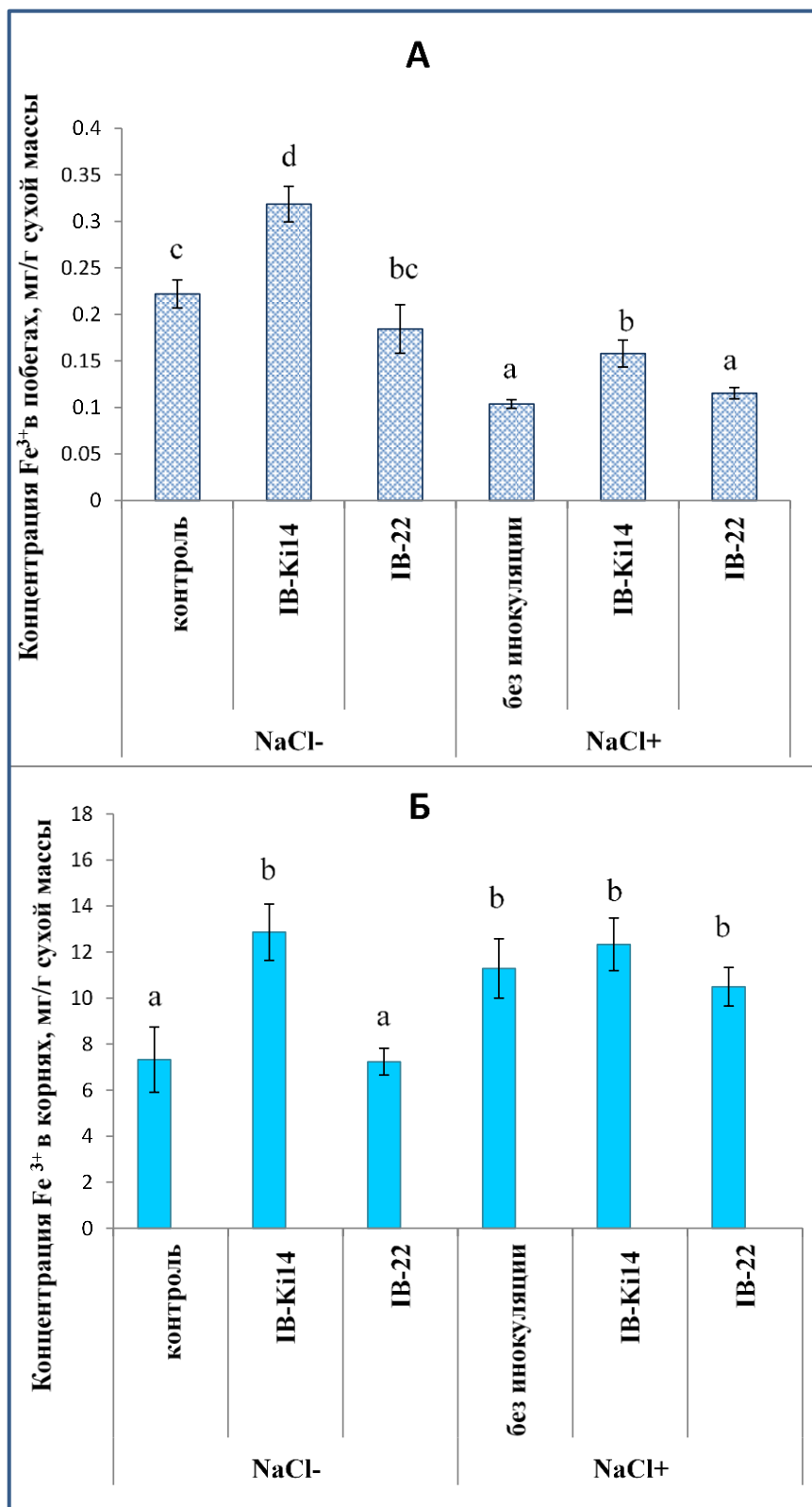


Рис 3. Концентрация ионов железа в побегах (А) и корнях (Б) растений пшеницы на 14 сутки после внесения *P. mandelii* IB-Ki14 или *B. subtilis* IB-22 бактерий в прикорневую среду растений. Достоверно отличающиеся значения ($n = 6$) обозначены разными буквами ($p < 0.05$, $n = 6$, тест Дункана).

Эту особенность нельзя связать с формированием апопластных барьеров, поскольку высокий уровень железа в корнях был характерен и для контрольных растений пшеницы, у которых лигнификации и суберинизации не было еще заметно на данной стадии их развития (Рис. 1). Задержку железа в тканях корня объясняют его связыванием с гемицеллюлозой корней [Shi et al., 2018], что может быть причиной более высокого содержания железа в корнях по сравнению с побегом в наших опытах. Еще одна интересная закономерность заключалась в увеличении содержания железа в корнях и снижении – в побегах при действии засоления. Эти изменения можно объяснить усиленным формированием апопластных барьеров, которые могли препятствовать поступлению железа из корней в побеги и способствовать их накоплению в корнях. Эти результаты соответствуют данным литературы о влиянии апопластных барьеров на транспорт железа в растениях [Jiménez et al., 2021].

Увеличение содержания железа как в побегах, так и корнях было зарегистрировано при инокуляции ризосферы растений штаммом *P. mandelii* IB-Ki14. Известна способность бактерий рода *Pseudomonas* продуцировать сидерофоры, связывающие ионы железа, и тем самым повышать его доступность для растений [Коршунова и др., 2021], чем можно объяснить повышение уровня железа в побегах и корнях растений, ризосферу которых инокулировали штаммом *P. mandelii* IB-Ki14.

Представляло интерес сопоставить полученные в данной работе результаты с показателями роста растений. Как видно из рисунка 4, засоление снижало скорость накопления биомассы растений, а инокуляция гормонпродуцирующими микроорганизмами стимулировала накопление биомассы растений как в отсутствие засоления, так и на его фоне.

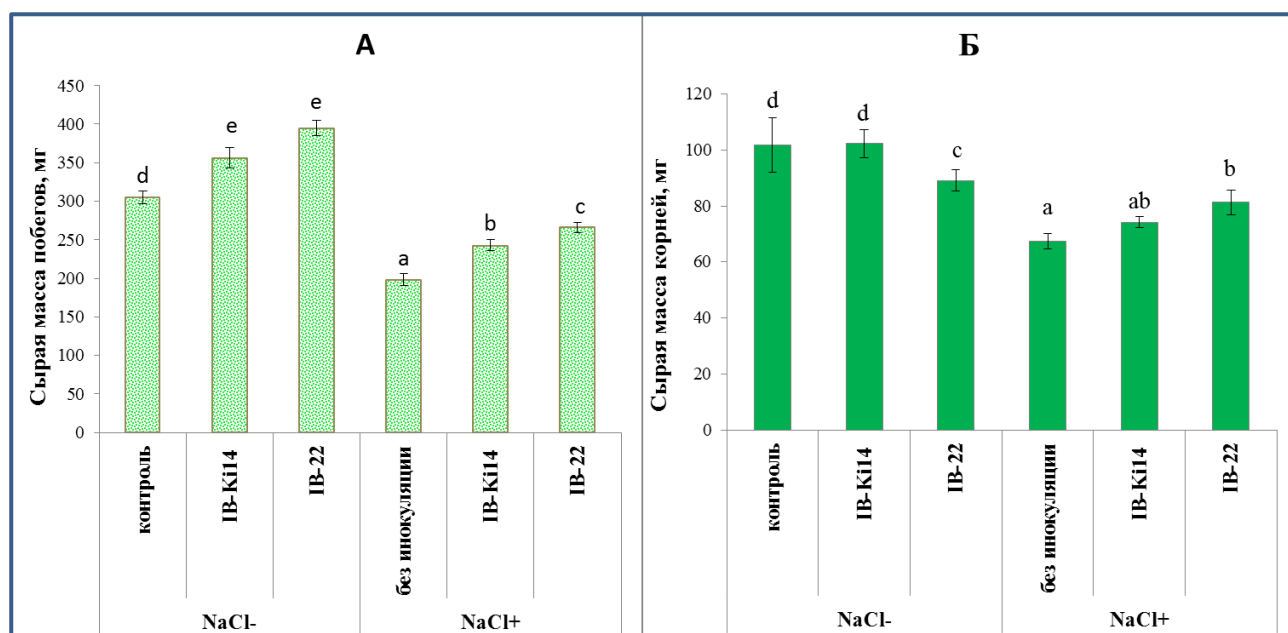


Рис.4 Сырая масса побегов (А) и корней (Б) пшеницы через 14 дней после бактериальной обработки *P. mandelii* IB-Ki14 или *B. subtilis* IB-22. Достоверно отличающиеся значения (n = 36) обозначены разными буквами (p < 0.05, n = 6, тест Дункана).

Ингибирование роста растений под влиянием засоления объясняется как нарушением водного обмена у растений, так и накоплением токсичных ионов натрия [Веселов и др., 2007]. Пониженный уровень железа в побеге по сравнению с корнями не сказался отрицательно на состоянии растений в условиях без засоления, о чем можно было судить по отсутствию хлороза (характерный признак дефицита железа) [Talas et al., 2016]. Тем не менее, снижение

уровня железа в побегах под влиянием засоления могло способствовать его ростингибирующему действию.

Инокуляция бактериями ризосферы растений пшеницы стимулировала рост как побега, так и корня (Рис.4 А, Б). Это можно объяснить показанной ранее способностью бактерий этих штаммов продуцировать гормоны стимулирующего типа действия [Мартыненко и др., 2023]. Ростстимулирующему действию псевдомонад могло также способствовать повышение под их влиянием уровня железа как в побегах, так и в корнях растений.

Обобщая полученные результаты, можно отметить, что как засоление, так и бактериализация растений пшеницы оказывала влияние на содержание в них кальция и железа. Некоторые из этих эффектов (снижение уровня кальция в побегах под влиянием штамма псевдомонад на фоне засоления, а также изменение в распределении кальция и железа между побегом и корнем при засолении) можно объяснить усилением апопластных барьеров. Однако связь между изменением уровня этих элементов и формированием апопластных барьеров удавалось проследить не во всех случаях. Очевидно, что изменение уровня кальция и железа зависит еще и от других факторов, таких как влияние засоления и бактерий на активность транспортеров ионов и способности бактерий продуцировать сидерофоры.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена с использованием приборной базы ЦКП «Агидель», при частичной финансовой поддержке темы №123020800002-2 в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №075-01134-23-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веселов Д.С., Маркова И.В., Кудоярова Г.Р. Реакция растений на засоление и формирование солеустойчивости // Успехи современной биологии. 2007. № 5. С. 482-493.
2. Коршунова Т.Ю., Бакаева М.Д., Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Четвериков С.П., Четверикова Д.В., Логинов О.Н. Роль бактерий рода *Pseudomonas* в устойчивом развитии агроэкосистем и защите окружающей среды // Прикладная биохимия и микробиология. 2021. Т. 57. № 3. С. 211-227. DOI: [10.31857/S0555109921030089](https://doi.org/10.31857/S0555109921030089)
3. Кузьмина Л.Ю., Высоцкая Л.Б., Галимзянова Н.Ф., Гильванова Е.А., Рябова А.С., Мелентьев А.И. Новые штаммы фосфатмобилизующих бактерий, продуцирующих ауксин, перспективные для сельскохозяйственной биотехнологии // Изв. Уфим. научн. Центра РАН. 2015. № 1. С.40-46.
4. Кузьмина Л.Ю., Архипова Т.Н., Актуганов Г.Э., Галимзянова Н.Ф., Четвериков С.П., Мелентьев А.И. Бактерии родов *Advenella*, *Bacillus* и *Pseudomonas* – перспективная основа биопрепаратов для растениеводства // Биомика. 2018. Т. 10. № 1. С. 16-20. DOI: [10.31301/2221-6197.bmcs.2018-4](https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2018-4)
5. Мартыненко Е.В., Архипова Т.Н., Ахтямова З.А., Кузьмина Л.Ю. Действие штаммов бактерий с разной способностью к синтезу ауксинов и цитокининов на рост и водный обмен растений пшеницы // Агробиотех. 2023. № 1, С. 49-56 DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188123010064>
6. Akhtyamova Z., Martynenko E., Arkhipova T., Seldimirova O., Galin I., Belimov A., Vysotskaya L., Kudoyarova G. Influence of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on the Formation of Apoplastic Barriers and Uptake of Water and Potassium by Wheat Plants //

- Microorganisms. 2023. V. 11 (5). P. 1227.
DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051227>
7. Arkhipova T.N., Veselov S.U., Melentiev A.I., Martynenko E.V., Kudoyarova G.R. Ability of bacterium *Bacillus subtilis* to produce cytokinins and to influence the growth and endogenous hormone content of lettuce plants // *Plant Soil*. 2005. V. 272. P. 201-209.
 8. Barberon M. The endodermis as a checkpoint for nutrients // *New Phytologist*. 2017. V. 213 (4). P. 1604-1610. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.14140>
 9. Belimov A.A., Shaposhnikov A.I., Syrova D.S., Kichko A.A. et al. The Role of Symbiotic Microorganisms, Nutrient Uptake and Rhizosphere Bacterial Community in Response of Pea (*Pisum sativum* L.) Genotypes to Elevated Al Concentrations in Soil // *Plants*. 2020. V. 9 (12). P. 1801. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9121801>
 10. Byrt C.S., Munns R., Burton R.A., Gilliam M., Wege S. Root cell wall solutions for crop plants in saline soils // *Plant Science*. 2018, V. 269. P. 47-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.12.012>
 11. Chen T., Cai X., Wu X., Karahara I., et al. Casparian strip development and its potential function in salt tolerance // *Plant Signalling and Behavior*. 2011. V. 6 (10). P. 1499-1502. DOI: <https://doi.org/10.4161/psb.6.10.17054>
 12. Jiménez J.C., Clode P.L., Signorelli S., et al. The barrier to radial oxygen loss impedes the apoplastic entry of iron into the roots of *Urochloa humidicola* // *Journal of Experimental Botany*. 2021. V. 72 (8). P. 3279-3293. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erab043>
 13. King E.O., Ward M.K., Raney D.E. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescein // *J. Lab. Clin. Med.* 1954. V.44 (2). P. 301-307.
 14. Krishnamurthy P., Ranathunge K., Franke R., Prakash H.S., et al. The role of root apoplastic transport barriers in salt tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) // *Planta*. 2009. V. 230. P. 119-134. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00425-009-0930-6>
 15. Laohavisit A., Richards S.L., Shabala L., Chen C., et al. Salinity-induced calcium signaling and root adaptation in *Arabidopsis* require the calcium regulatory protein annexin // *Plant Physiol*. 2013. V. 163 (1). P. 253-262. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.113.217810>
 16. Martynenko E., Arkhipova T., Safronova V., Seldimirova O., Galin I., Akhtyamova Z., Veselov D., Ivanov R., Kudoyarova G. Effects of Phytohormone-Producing Rhizobacteria on Casparian Band Formation, Ion Homeostasis and Salt Tolerance of Durum Wheat // *Biomolecules*. 2022. V. 12 (2). P. 230. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom12020230>
 17. Musielak T.J., Schenkel L., Kolb M., Henschen A., Bayer M. A simple and versatile cell wall staining protocol to study plant reproduction // *Plant Reprod*. 2015. V. 28. P. 161-169. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00497-015-0267-1>
 18. Tadrosova M., Uhlik O., Suman J. What goes underground comes around: the molecular basis of crosstalk between plants and soil microorganisms // *Phytochem. Rev.* 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11101-024-09989-x>
 19. Shi R., Melzer M., Zheng S., et al. Iron Retention in Root Hemicelluloses Causes Genotypic Variability in the Tolerance to Iron Deficiency-Induced Chlorosis in Maize // *Front. Plant Sci*. 2018. V. 9. P. 557. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00557>
 20. Talas Y., Aydin S., Yegenoglu E.D., Simsek H. Iron (Fe) and iron chlorosis in plant nutrition // *Annals of Warsaw University of Life Sciences*. 2016. V. 37. P. 3-9.
 21. Tränkner M., Tavakol E., Jáklí B. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection // *Physiologia Plantarum*. 2018. V. 163 (3). P. 414-431. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppl.12747>

Цитировать как

Белимов А.А., Мартыненко Е.В., Архипова Т.Н., Галин И.Р. Концентрация кальция и железа в растениях пшеницы при формировании поясков Каспари под влиянием засоления и ростстимулирующих бактерий // Экобиотех. 2025. Т. 8 № 1. С. 91-100. DOI: 10.31163/2618-964X/2025-9 EDN: TXHNNQ

Сведения об авторах

Андрей Алексеевич Белимов, д.б.н., Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, Пушкин, Россия. E-mail: belimov@rambler.ru, AuthorID: 34092, ORCID: 0000-0002-9936-8678

Елена Викторовна Мартыненко, к.б.н., Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия. E-mail: evmart08@mail.ru, AuthorID: 160329, ORCID: 0000-0001-9090-2806

Татьяна Николаевна Архипова, к.б.н., Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия. E-mail: tnarkhipova@mail.ru, AuthorID: 189637, ORCID: 0000-0002-6971-1084

Ильшат Рафкатович Галин, к.б.н., Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия. E-mail: ilshat.rafkatovitch@gmail.com, AuthorID: 863521, ORCID: 0000-0003-2964-0805

Cited as

Belimov A.A., Martynenko E.V., Arkhipova T.N., Galin I.R. The concentration of calcium and iron in wheat plants during the formation of Casparian strips under the influence of salinization and growth-stimulating bacteria. *Ecobiotech.* 2025, V. 8 (1). P. 91-100. DOI: 10.31163/2618-964X/2025-9 EDN: TXHNNQ (In Rus.)

Information About the Authors

Andrey A. Belimov, Doctor in Biological Sciences, All-Russian Research Institute for Agricultural Microbiology, Pushkin, St.-Petersburg, Russian Federation. E-mail: belimov@rambler.ru, AuthorID: 34092, ORCID: 0000-0002-9936-8678

Elena V. Martynenko, PhD in Biological Sciences, Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation. E-mail: evmart08@mail.ru, AuthorID: 160329, ORCID: 0000-0001-9090-2806

Tatiana N. Arkhipova, PhD in Biological Sciences, Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation. E-mail: tnarkhipova@mail.ru, AuthorID: 189637, ORCID: 0000-0002-6971-1084,

Ilshat R. Galin, PhD in Biological Sciences, Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation. E-mail: ilshat.rafkatovitch@gmail.com, AuthorID: 863521, ORCID: 0000-0003-2964-0805