

ЭФФЕКТИВНОСТЬ БАКТЕРИАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ АЗОБАКТЕРИН И КАЛИПЛАНТ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА ЭРОДИРОВАННЫХ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВАХ

© 2020 г. В. В. Лапа¹, Н. А. Михайловская^{1,*}, С. А. Касьянчик¹,
Н. Н. Цыбулько¹, Т. Б. Барашенко¹

¹ Институт почвоведения и агрохимии 220108 Минск, ул. Казинца, 90, Беларусь

*E-mail: bionf1@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.05.2019 г.

После доработки 19.07.2019 г.

Принята к публикации 10.11.2019 г.

В Центральной и Северной почвенных провинциях Беларуси в длительных стационарных опытах на дерново-подзолистых суглинистых почвах, в разной степени подверженных водно-эрозионной деградации, изучена эффективность бактериальных удобрений – азобактерина (*Azospirillum brasilense* ВКПМ В-4485) и калипланта (*Bacillus circulans* БИМ В-376Д) при возделывании зерновых культур. Применение азобактерина и калипланта повышало адаптационный потенциал растений за счет аддитивного действия биологических механизмов стимуляции (гормонального эффекта, улучшения минерального питания, биоконтроля) и обеспечивало повышение урожайности и качества продукции зерновых культур. Эффективность бактериальных удобрений повышалась в условиях стресса на средне- и сильноэродированных почвах. На дерново-подзолистых почвах на лессовидных суглинках прибавки зерна от азобактерина в среднем составили 4.6, 5.6 и 6.5% соответственно на неэродированной, слабо- и среднеэродированной почвах; от калипланта – 11.4, 11.5 и 16.4%. На дерново-подзолистых почвах на моренных суглинках прибавки зерна от азобактерина достигали 5.9, 5.3 и 7.9%; от калипланта – 8.3%, 8.5% и 14.4% соответственно на неэродированной, средне- и сильноэродированной почвах. Азобактерин повышал содержание и сбор сырого протеина в зерне ярового ячменя на 2.0–2.6% и 1.2–1.6 ц/га, озимой ржи – на 1.1–1.8% и 0.7–1.0 ц/га соответственно. Калиплант улучшал качество белка яровой пшеницы за счет повышения содержания критических (Lys*, Thr* и Met*) и незаменимых (Val, Phe, Ile, Leu) аминокислот.

Ключевые слова: азобактерин, калиплант, адаптация, эродированные дерново-подзолистые суглинистые почвы, зерновые культуры.

DOI: 10.31857/S0002188120020088

ВВЕДЕНИЕ

На территории Беларуси водная эрозия представляет серьезную экологическую проблему. Холмисто-грядовый рельеф, недостаточная увлажненность территории и специфика почвообразующих пород способствуют развитию водно-эрозионных процессов на пахотных землях в Центральной и Северной почвенно-экологических провинциях республики [1]. В результате поверхностного смыва с обрабатываемых склонов выносятся от 0.1 до 100 и более т/га почвы ежегодно [2]. При этом происходят потери органического вещества, минеральной части почвы и прочно связанных с ними микробной биомассы и экстрацеллюлярных почвенных ферментов [3, 4]. Обусловленное водной эрозией ухудшение агрофизических, агрохимических и биологических свойств

почв приводит к снижению их производительной способности. Снижение урожайности зерновых культур достигает 12–40% в зависимости от степени эродированности почвы [1].

На эродированных почвах, где растения подвержены стрессу и испытывают дефицит элементов питания, приоритетной задачей является повышение их адаптивного потенциала и урожайности. Значимый эффект дает применение микробных удобрений, способных воздействовать на метаболизм растений и повышать их адаптивные возможности, за счет вовлечения биологических механизмов стимуляции роста, улучшения минерального питания и биологического контроля фитопатогенов.

Наибольший интерес представляют микробные удобрения, включающие азотфиксирующие

и калиймобилизующие бактерии. Среди азотфиксаторов перспективны *Azospirillum* spp., отличающиеся разносторонним приспособительным метаболизмом углерода и азота. Источниками азота для *Azospirillum* spp. могут служить атмосферный азот, аммоний, нитраты, нитриты [5–7]. *Azospirillum* spp. оказывают существенный гормональный эффект на растения [8, 9]. Зональный штамм *Azospirillum brasilense* ВКПМ В-4485, на основе которого создано бактериальное удобрение азобактерин, характеризуется высоким азотфиксирующим потенциалом и способностью к растворению ортофосфата кальция [10], положительно воздействует на активность нитратредуктазы (*nir+*) [11].

Среди бактерий, способных к мобилизации калия из труднодоступных почвенных форм, наиболее перспективны распространенные в умеренной зоне слизистые бациллы [12–14]. Слизеобразование является также защитным фактором, обеспечивающим выживание бактерий в ризосфере при неблагоприятных экологических условиях. Наши исследования подтвердили высокую активность калиймобилизации у слизеобразующих бацилл. При изучении потенциальной способности к мобилизации калия из слюд и гидрослюд наибольшую активность мобилизации калия регистрировали именно у слизеобразующих бацилл [15, 16]. По результатам тестирования в лабораторных и вегетационных экспериментах отобран активный штамм *Bacillus circulans* БИМ В-376Д, на основе которого создано бактериальное удобрение калиплант. Штамм *Bacillus circulans* БИМ В-376Д [17] характеризуется способностью к мобилизации труднодоступных форм почвенного калия [15], мобилизации фосфора из нерастворимых трехзамещенных ортофосфатов кальция и высокой ростостимулирующей активностью [10].

Цель работы – изучить влияние биоудобрений азобактерин и калиплант на урожайность и качество зерновых культур на эродированных дерново-подзолистых почвах Республики Беларусь.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытания бактериальных удобрений (БУ) азобактерина и калипланта проводили в полевых опытах на эродированных дерново-подзолистых почвах в Центральной (стационар “Стоковые площадки”, Минская обл.) и Северной (стационар “Браслав”, Витебская обл.) почвенно-экологических провинциях Беларуси.

Полевые опыты по оценке эффективности азобактерина на зерновых культурах. В 2014–2016 гг. в 2-х стационарных опытах изучена эффективность азобактерина на озимой пшенице (*Triticum*

aestivum L.) сорта Богатка на эродированных почвах. Опыты заложены по геоморфологическому профилю, на водоразделе расположена неэродированная почва, в верхней части склона – среднеэродированная, в средней части – сильноэродированная почва. На дерново-подзолистой почве на мощных лессовидных суглинках (“Стоковые площадки”, склон южной экспозиции) действие азобактерина изучали на общем фоне применения минеральных удобрений N60+40P60K100. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы: гумус – 1.8–2.5%; рН 5.2–5.9; P₂O₅ – 290–330 и K₂O – 180–230 мг/кг. Агрохимические показатели определяли по общепринятым методикам: органическое вещество – ГОСТ 26213–91, обменная кислотность рН_{KCl} – потенциметрическим методом по ГОСТ 26483–85, содержание подвижных форм фосфора и калия – по Кирсанову (ГОСТ 26207–91).

На дерново-подзолистой почве на мощных моренных суглинках (Витебская обл.) эффективность азобактерина изучали на фоне применения N70+20P50K120. Агрохимическая характеристика почвы опытного участка: гумус – 1.9–2.1%, рН 6.2–6.5, P₂O₅ – 210–306 и K₂O – 180–195 мг/кг.

Эффективность азобактерина на яровом ячмене (*Hordeum vulgare* L.) сорта Стратус в 2017 г. и озимой ржи (*Secale cereale* L.) сорта Пламя в 2018 г. изучена в стационарном опыте “Стоковые площадки” (склон северной экспозиции) на неэродированной, слабо- и среднеэродированной дерново-подзолистой почве на мощных лессовидных суглинках. Агрохимические свойства пахотного слоя почвы: гумус – 1.8–2.1%, рН 5.4–5.8, P₂O₅ – 328–360 и K₂O – 233–300 мг/кг. Фон удобрений – N90 + 30P50K100.

Полевые опыты по оценке эффективности калипланта на яровой пшенице. Оценка эффективности бактериального удобрения калиплант на яровой пшенице (*Triticum aestivum*) проводили на тех же стационарах. Действие калипланта при обработке посевов яровой пшеницы сортов Контесса (2004 г.) и Рассвет (2006, 2007 гг.) изучено на эродированных дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах, сформированных на мощных моренных суглинках (Витебская обл.) на фоне применения N80P60K86. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы: гумус – 1.5–2.0%, рН 6.1–6.3, P₂O₅ – 177–280 и K₂O – 127–185 мг/кг.

Оценку действия калипланта на яровой пшенице сортов Контесса и Рассвет при инокуляции семян проводили на эродированных дерново-подзолистых почвах на мощных лессовидных суглинках (стационар “Стоковые площадки”, склон южной экспозиции) на фоне N77P47K63 + + навоз 30 т/га. Агрохимическая характеристика

пахотного слоя почвы: гумус – 1.6–2.0%, рН 5.5–5.8, P_2O_5 – 346–432 и K_2O – 316–428 мг/кг.

Повторность в опытах трехкратная. В стационаре “Стоковые площадки” общая площадь делянки на незэродированной почве – 50 м², на эродированных – 40 м², учетная площадь – 35 и 30 м²; в стационаре “Браслав” общая площадь делянки – 12 и 10.5 м², учетная – 9 и 7.5 м² соответственно.

Фосфорные и калийные удобрения (АФ, K_x) в опытах применяли в основное внесение, азотные (N_M) – в основное внесение и подкормку. Навоз (30 т/га) вносили под зяблевую вспашку. Для инокуляции зерновых культур использовали жидкую препаративную форму бактериальных удобрений. Титры бактерий в препаратах были не меньше 1.5×10^9 КОЕ/мл. Инокуляцию посевов озимых культур проводили весной в фазе кушения, яровых – в фазе всходов–начало кушения, состав рабочей смеси в расчете на 1 га: 1 л БУ + + 150–200 л воды. Для предпосевной обработки семян калиплантом использовали рабочую смесь в расчете на 1 т семян: 1 л БУ, 1–2 л 2%-ного водного раствора прилипателя (NaКМЦ) и 3–4 л воды.

Агрометеорологические условия в годы исследования в целом были благоприятными для возделывания зерновых культур. За 8-летний период наблюдений в стационаре “Стоковые площадки” гидротермический коэффициент (ГТК) за вегетационный период варьировал от 1.23 до 1.81 при среднегодовой норме 1.64. 2007 г. и 2015 г. характеризовались как слабо засушливые (ГТК 1.23 и 1.32), в 2018 г. отмечены повышенные температуры и неравномерное выпадение осадков. За 6-летний период исследований в стационаре “Браслав” 2007 г. и 2016 г. характеризовались как слабо засушливые (ГТК 1.26 и 1.20) при среднегодовой норме 1.61.

Лабораторные эксперименты по оценке антагонистической активности штаммов азотфиксирующих и калиймобилизующих бактерий. Антагонистическую активность штаммов *A. brasilense* и *V. circulans* по отношению к фитопатогенам зерновых культур р. *Fusarium* (*F. poae*, *F. oxysporum*, *F. graminearum*) и *Alternaria* sp. изучали с применением методов встречных культур и агаровых блоков на картофельно-глюкозном агаре [18]. Ингибирование радиального роста гриба (ИРРГ) через 3, 5, 7 и 10 сут экспозиции вычисляли по формуле: ИРРГ (%) = $[1 - (\text{рост гриба в сторону бактериальной культуры, мм} / \text{рост гриба в той же чашке Петри в обратную сторону (контроль), мм}) \times 100\%$ [18].

Биологическую ценность продукции определяли по основным показателям качества зерна – содержанию сырого белка и его аминокислотному составу. Содержание критических (АКкр* – треонин, метионин, лизин) и незаменимых (АКн –

треонин, метионин, лизин, валин, фенилаланин, изолейцин и лейцин) аминокислот в белке определяли на жидкостном хроматографе HP AGILENT 1100 SERIES. По содержанию незаменимых и критических аминокислот в белке рассчитаны аминокислотный скор и химическое число. Аминокислотный скор (%) характеризует содержание аминокислот в белке по отношению к аминокислотной шкале ФАО/ВОЗ. Химическое число (%) характеризует содержание аминокислот в белке зерна по отношению к идеальному белку [19].

Для статистической обработки результатов применяли дисперсионный анализ с использованием программы MS Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность азобактерина на озимой пшенице на эродированных почвах. В исследованиях [20] было установлено, что интродуцированные *A. brasilense* В-4485 конкурентно заселяют корни пшеницы, ячменя и злаковых трав. В течение вегетации численность бактерий постепенно снижалась и ко времени уборки урожая практически сравнялась со спонтанной в почвах Беларуси. Аналогичные закономерности получены для *A. brasilense* Cd [21]. В работах [22, 23] доказано, что для воздействия *A. brasilense* на метаболизм растений достаточно краткого контакта с корнями в начальных фазах онтогенеза при высокой концентрации интродуцента.

В 2-х полевых опытах на эродированных почвах изучено влияние азобактерина (обработка посевов) на урожайность и качество озимой пшеницы сорта Богатка. Положительный эффект от азобактерина получен на разных элементах склона, прибавки зерна составили: на дерново-подзолистой почве на лессовидных суглинках – 3.5, 3.5 и 3.3 ц/га (5.0, 5.5 и 5.6%), на моренных суглинках – 3.1, 2.7 и 3.1 ц/га (5.9, 5.3 и 7.9%) на незэродированной, средне- и сильноэродированной почвах соответственно. Азобактерин оказал влияние на качество зерна: содержание сырого протеина повышалось на 0.5–0.9% при возделывании озимой пшеницы на дерново-подзолистой почве на лессовидных суглинках и на 0.4–0.5% – на моренных суглинках. Отмечено достоверное увеличение массы 1000 зерен (табл. 1).

Интерес к азоспириллам во многом связан с возможностью регулирования накопления белка в зерне. По результатам наших исследований можно отметить, что *A. brasilense* В-4485 действительно вносил вклад в обеспечение растений азотом [24]. В работах [5, 25] в качестве возможных механизмов влияния инокуляции на метаболизм азота рассмотрены азотфиксация и денитрификация. В зависимости от концентрации кислоро-

Таблица 1. Влияние азобактерина на урожайность и качество зерна озимой пшеницы сорта Богатка на эродированных дерново-подзолистых суглинистых почвах (2014–2016 гг.)

Вариант		Дерново-подзолистая почва									
		на моренных суглинках					на лессовидных суглинках				
		сырой протеин, %	масса 1000 зерен, г	урожайность, ц/га	прибавка		сырой протеин, %	масса 1000 зерен, г	урожайность, ц/га	прибавка	
ц/га	%				ц/га	%					
Неэродированная почва	К	12.9	42.9	52.5	—		11.9	46.9	69.4	—	
	БУ	13.3	43.4	55.6	3.1	5.9	12.8	48.5	72.9	3.5	5.0
Среднеэродированная почва	К	12.4	42.4	50.7	—		11.8	45.3	64.2	—	
	БУ	12.9	42.9	53.4	2.7	5.3	12.3	46.8	67.7	3.5	5.5
Сильноэродированная почва	К	12.2	39.6	39.4	—		11.5	44.7	59.0	—	
	БУ	12.7	41.1	42.5	3.1	7.9	12.4	46.3	62.3	3.3	5.6
<i>HCP</i> ₀₅											
фактор А (почва)		0.33	0.48	3.04			0.66	0.45	2.93		
фактор Б (БУ)		0.40	0.39	3.00			0.70	0.46	3.19		

Примечание. К – контроль без удобрения, БУ – бактериальное удобрение азобактерин (обработка посевов). То же в табл. 2, 3.

да и нитратов в среде, а также от свойств штамма инокулянта (*nir*⁺ или *nir*[–]) ассоциация может обеспечивать растения азотом либо за счет азотфиксации, либо за счет денитрификации. Повышение ассимиляции азота из почвы и удобрений за счет стимуляции роста растений – также фактор, способствующий накоплению азота в инокулированных растениях [7, 11, 20, 23].

В 2017 г. в полевом опыте на эродированных дерново-подзолистых почвах на лессовидных суглинках изучена эффективность азобактерина (*A. brasilense*) на посевах ярового ячменя Стратус. Эффективность бактериального удобрения существенно повышалась в стрессовых условиях на эродированных почвах. На слабо- и среднеэродированных почвах прибавки от инокуляции посевов азобактерином составили 3.5 и 3.4 ц/га (6.6%) по сравнению с 2.8 ц/га (4.9%) на неэродированной почве. Аналогичные закономерности были отмечены при возделывании озимой ржи сорта Пламя в 2018 г. Азобактерин действовал эффективнее в условиях стресса. На неэродированной почве прибавка от инокуляции посевов составила 2.1 ц/га (3.9%), на слабоэродированной – 2.2 ц/га (4.3%) и на среднеэродированной – 3.0 ц/га (6.5%). В среднем за 2 года эффективность азобактерина составила 3.0 ц к.е./га (4.6%) на водоразделе, 3.5 ц к.е./га (5.6%) на слабо- и 3.8 ц к.е./га (6.5%) на среднеэродированной почве (табл. 2).

Влияние азобактерина на качество продукции зерновых культур проявлялось в повышении содержания сырого протеина в зерне, увеличении сбора сырого белка и массы 1000 зерен. Для яро-

вого ячменя сорта Стратус показатели повышения содержания сырого протеина и сбора сырого белка составили 2.0–2.6% и 1.2–1.6 ц/га, для озимой ржи сорта Пламя – 1.1–1.8% и 0.7–1.0 ц/га соответственно (табл. 3). Таким образом, применение азобактерина при возделывании озимой пшеницы, озимой ржи и ярового ячменя позволило повысить урожайность и качество зерна по содержанию сырого протеина на разных элементах склона.

Гормональный эффект считается одним из основных факторов повышения урожайности при использовании бактериальных удобрений. При внесении азоспирилл наблюдают характерные признаки действия ауксинов и их производных, к которым относятся увеличение объема и массы корней, числа и массы побегов [26]. Краткосрочные *in vitro* эксперименты по определению количественной оценки влияния *A. brasilense* В-4485 на развитие растений в начальные стадии онтогенеза показали, что за счет инокуляции объем корней увеличивался в среднем на 30, их сырая масса – на 54, сырая масса надземной части – на 25% [10]. Однако гормональный эффект может быть не единственным фактором, ответственным за стимуляцию роста при использовании азоспирилл. В работе [8] приведено альтернативное объяснение стимуляции роста: в анаэробных условиях в присутствии нитратов *Azospirillum* (*nir*⁺) способны восстанавливать их до нитритов, которые при взаимодействии с аскорбиновой кислотой образуют соединение, способное также существенно

Таблица 2. Влияние азобактерина на урожайность зерновых культур на эродированных дерново-подзолистых почвах на лессовидных суглинках

Вариант		Яровой ячмень, сорт Стратус, 2017 г.			Озимая рожь, сорт Пламя, 2018 г.			Среднее, 2017–2018 гг.		
		урожайность, ц/га	прибавка		урожайность, ц/га	прибавка		урожайность, ц/га к.ед.	прибавка	
			ц/га	%		ц/га	%		ц/га к.ед.	%
Неэродированная почва	К	56.2			54.0			65.8		
	БУ	59.0	2.8	4.9	56.1	2.1	3.9	68.8	3.0	4.6
Слабоэродированная почва	К	53.0			51.3			62.3		
	БУ	56.5	3.5	6.6	53.5	2.2	4.3	65.8	3.5	5.6
Среднеэродированная почва	К	51.8			46.1			58.6		
	БУ	55.2	3.4	6.6	49.1	3.0	6.5	62.4	3.8	6.5
<i>HCP</i> ₀₅										
фактор А (почва)		1.8			2.7			2.4		
фактор Б (БУ)		2.8			3.0			2.9		

Таблица 3. Влияние азобактерина на качество зерновых культур на эродированных дерново-подзолистых почвах на лессовидных суглинках (2017–2018 гг.)

Вариант		Яровой ячмень сорта Стратус			Озимая рожь сорта Пламя		
		сырой протеин, %	сбор протеина, ц/га	масса 1000 зерен, г	сырой протеин, %	сбор протеина, ц/га	масса 1000 зерен, г
Неэродированная почва	К	11.1	5.4	52.2	9.6	4.5	45.3
	БУ	13.1	6.6	53.8	11.2	5.4	46.6
Слабоэродированная почва	К	9.9	4.5	51.4	9.1	4.0	42.9
	БУ	12.5	6.1	52.4	10.9	5.0	43.6
Среднеэродированная почва	К	9.6	4.3	50.8	9.0	3.6	41.2
	БУ	11.8	5.6	51.6	10.1	4.3	42.8
<i>HCP</i> ₀₅							
фактор А (почва)		0.56		0.30	0.38		0.28
фактор Б (БУ)		0.88		0.50	0.69		0.46

стимулировать рост растений. Этот эффект часто ошибочно интерпретируют как гормональный.

Стимуляция развития корневой системы за счет разных механизмов приводит к увеличению поглощающей поверхности корней и обеспечивает повышение адаптивных возможностей инокулированных азобактерином растений по использованию воды [9] и элементов минерального питания из почвы и удобрений [10, 11, 23], что актуально в условиях стресса на эродированных почвах.

Эффективность калипланта на эродированных почвах. Исследования по оценке эффективности калипланта на яровой пшенице проведены в 2004–2007 гг. на наиболее подверженных водно-эрозионным процессам дерново-подзолистых

почвах на лессовидных и моренных суглинках. Установлено, что предпосевная обработка семян калиплантом приводила к повышению продуктивности яровой пшеницы по всей почвенно-эрозионной катене. На дерново-подзолистой почве на лессовидных суглинках среднегодовые прибавки от калипланта составили: на водоразделе – 7.8 (11.4%), на среднеэродированной почве – 7.0 (11.5%) и на сильноэродированной – 9.1 ц к.е./га (16.4%). На дерново-подзолистой почве на моренных суглинках прибавки от калипланта составили: на водоразделе – 4.5 (8.3%), на среднеэродированной почве – 3.9 (8.5%) и на сильноэродированной – 5.6 ц к.е./га (14.0%) (рис. 1).

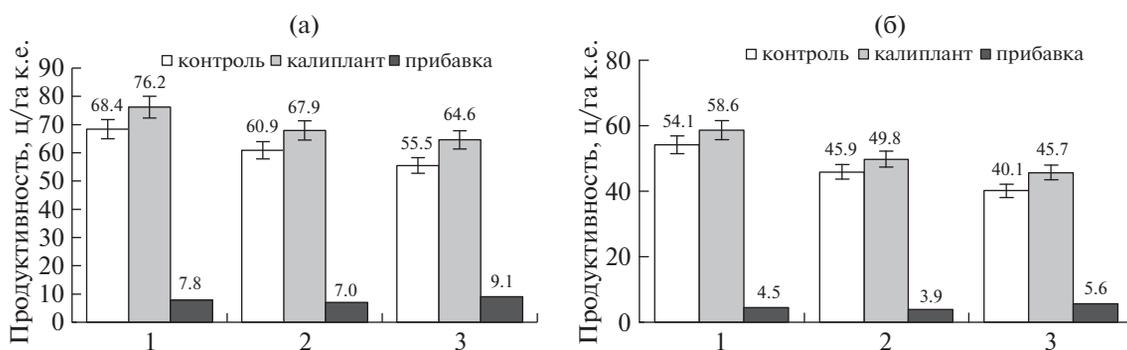


Рис. 1. Среднегодовая продуктивность яровой пшеницы (2004–2007 гг.) на дерново-подзолистых почвах на лессовидных (а) и моренных (б) суглинках; 1 – неэродированная, 2 – среднеэродированная, 3 – сильноэродированная почва.

Тот факт, что наибольший эффект от инокуляции отмечен на сильноэродированных почвах, свидетельствует об антистрессовом действии калипланта. Предпосевная инокуляция семян оказывала значимый адаптационный эффект. В краткосрочных *in vitro* экспериментах стимуляция развития корневой системы и надземной части растений под влиянием калиймобилизующих бактерий проявлялась в увеличении объема корней на 18, их сырой массы – на 24, сухой массы – на 40, сырой и сухой массы надземной части – на 18 и 6% соответственно [10, 27]. Основными факторами адаптации были увеличение поглощающей поверхности корней и способность *B. circulans* повышать подвижность почвенных запасов калия за счет его мобилизации из труднодоступных форм. В специальных *in vitro* экспериментах с калийсодержащими минералами установлена способность *B. circulans* использовать калий мусковита, гидромусковита и биотита, а также использовать разные по степени подвижности формы калия в мусковите [15].

В зависимости от конкретных экологических условий вклад разных механизмов действия калипланта может варьировать. Следует отметить, что на дерново-подзолистых почвах на лессовидных суглинках, отличающихся высоким содержанием K_2O , в качестве основных действующих факторов адаптации следует рассматривать гормональное действие и биологический контроль фитопатогенов. Вклад микробной мобилизации труднодоступных почвенных форм калия, очевидно, будет несущественным.

Влияние калипланта на качество яровой пшеницы на эродированных дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах. Наряду с показателями урожайности, приоритетное значение при возделывании зерновых культур на эродированных почвах имеет качество продукции. Изучено влияние калипланта на основные показатели качества зерна 2-х сортов яровой пшеницы при разных

способах внесения бактериального удобрения. Калиплант не оказывал существенного влияния на содержание белка в зерне яровой пшеницы. Однако при разных способах его внесения отмечено улучшение качества белка за счет повышения содержания критических (Lys^* , Thr^* и Met^*) и незаменимых (Val , Phe , Ile , Leu) аминокислот.

При возделывании яровой пшеницы на среднеэродированных дерново-подзолистых почвах на лессовидных суглинках за счет обработки семян калиплантом аминокислотный скор повышался на 13–19% для сорта Контесса и на 3–4% для сорта Рассвет; на неэродированных почвах для сорта Контесса – на 5, сорта Рассвет – на 2–6%. На сильноэродированных почвах тенденция повышения биологической ценности белка отмечена только для сорта Рассвет, скор критических и незаменимых кислот повышался на 2% (табл. 4).

При возделывании яровой пшеницы сортов Контесса и Рассвет на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве на моренных суглинках калиплант (обработка посевов) повышал биологическую ценность белка зерна по всей почвенно-эрозионной катене. Наибольшее положительное влияние отмечено для сорта Контесса. На среднеэродированной почве химическое число повышалось на 6–8, аминокислотный скор – на 8–11%, на неэродированной почве – на 3–5 и 3–7% соответственно. На сильноэродированной почве показатели биологической ценности зерна яровой пшеницы Контесса возрастали несущественно на 2–4% (табл. 5).

При возделывании яровой пшеницы сорта Рассвет значимый положительный эффект отмечен в условиях сильноэродированной почвы – химическое число повышалось на 3–8, аминокислотный скор – на 5–11%, на среднеэродированной почве – на 2–5 и 3–7%, на неэродированной почве – на 4–9 и на 5–12% соответственно. По биологической ценности белок яровой пшеницы, выращенной с применением калипланта, в

Таблица 4. Влияние калипланта на биологическую ценность белка яровой пшеницы на дерново-подзолистых почвах на лессовидных суглинках

Почва	Вариант	Lys*, мг/г белка	Содержание аминокислот, мг/г белка		Аминокислотный скор, % к шкале ФАО/ВОЗ	
			ΣАКкр*	ΣАКн	АКкр*	АКн
Яровая пшеница сорта Контецца						
Неэродированная почва	контроль	20.0	80.3	328	67	93
	калиплант	23.5	85.6	342	72	98
Среднеэродированная почва	контроль	19.1	70.1	264	59	75
	Калиплант	26.8	85.4	330	72	94
Сильноэродированная почва	Контроль	18.8	69.0	257	58	73
	Калиплант	19.1	68.5	257	58	74
<i>HCP</i> ₀₅		3.4				
Яровая пшеница сорта Рассвет						
Неэродированная почва	Контроль	19.9	66.3	255	56	73
	Калиплант	20.6	68.7	276	58	79
Среднеэродированная почва	Контроль	20.7	66.7	258	56	74
	Калиплант	24.4	71.7	268	60	77
Сильноэродированная почва	Контроль	18.2	64.7	258	54	74
	Калиплант	17.3	66.7	266	56	76
<i>HCP</i> ₀₅		2.8				

Примечание. АКкр* – критические аминокислоты, АКн – незаменимые аминокислоты. То же в табл. 5.

Таблица 5. Влияние калипланта на биологическую ценность белка яровой пшеницы на дерново-подзолистой почве на моренных суглинках

Почва	Вариант	Химическое число		Аминокислотный скор	
		%			
		ΣАКкр*	ΣАКн	АКкр*	АКн
Яровая пшеница Контецца					
Неэродированная почва	Контроль	43	57	58	74
	Калиплант	46	62	61	81
Среднеэродированная почва	Контроль	44	58	59	76
	Калиплант	50	66	67	87
Сильноэродированная почва	Контроль	47	62	63	81
	Калиплант	50	65	65	85
Яровая пшеница Рассвет					
Неэродированная почва	Контроль	35	50	46	65
	Калиплант	44	54	58	70
Среднеэродированная почва	Контроль	39	54	51	70
	Калиплант	44	56	58	73
Сильноэродированная почва	Контроль	38	54	50	70
	Калиплант	46	57	61	75

большей степени соответствовал требованиям ФАО/ВОЗ.

Антагонистическая активность *A. brasilense* и *B. circulans* по отношению фитопатогенным грибам рр. *Fusarium* и *Alternaria*. Факторами, влияющими на урожайность зерновых культур, явля-

ются антагонистические свойства азоспирилл и слизистых бацилл по отношению к фитопатогенам р. *Fusarium* – возбудителям распространенных болезней зерновых культур. В исследованиях *in vitro* по оценке активности биологического контроля у азотфиксирующих и калиймобилизующих бактерий по отношению к фитопатоген-

Таблица 6. Антагонистическая активность *A. brasilense* и *B. circulans* по отношению к фитопатогенным грибам рр. *Fusarium* и *Alternaria*

Фитопатогенный микромицет	ИРРГ, %							
	<i>A. brasilense</i>				<i>B. circulans</i>			
	Время экспозиции, сут							
	3	5	7	10	3	5	7	10
<i>F. poae</i>	15.1	27.8	43.9	44.1	26.1	27.5	42.3	42.3
<i>F. oxysporum</i>	9.1	19.0	33.7	34.8	14.2	22.4	25.8	26.3
<i>F. graminearum</i>	33.7	37.9	40.6	41.0	13.7	35.5	37.3	37.9
<i>Alternaria</i> sp.	17.3	23.9	25.4	27.3	12.9	20.0	27.4	29.2

Примечание. ИРРГ – ингибирование радиального роста гриба.

ным грибам установлено, что за счет штамма *A. brasilense* ингибирование радиального роста гриба *F. poae* на 5-е сут составило 27.8, на 7-е сут – 43.9, на 10-е сут – 44.1%; за счет *B. circulans* – 27.5, 42.3 и 42.3% соответственно. Ингибирование радиального роста гриба *F. oxysporum* азотфиксирующими бактериями на 5-е сут составило 19.0, на 7-е сут – 33.7 и на 10-е сут – 34.8%; для калиймобилизующих бактерий – 22.4, 25.8 и 26.3% соответственно (табл. 6). Данные свидетельствовали о фунгистатическом потенциале азотфиксирующих и калиймобилизующих бактерий, что позволяло сдерживать развитие болезней в посевах зерновых культур.

Бактериальные удобрения азобактерин и калиплант способны повышать адаптационный потенциал зерновых культур в стрессовых условиях на эродированных почвах за счет полифункционального положительного действия на растения, что в итоге приводит к повышению урожайности и качества продукции зерновых культур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что на эродированных почвах, где зерновые культуры подвержены стрессу, применение азобактерина и калипланта повышало их адаптационный потенциал за счет прямого стимулирующего действия штаммов *A. brasilense* ВКПМ В-4485 и *Bacillus circulans* БИМ В-376Д (гормональный эффект, улучшение минерального питания) и непрямого влияния (биологический контроль фитопатогенов). Аддитивное действие азобактерина и калипланта приводило к повышению урожайности и качества продукции зерновых культур на эродированных почвах.

Наибольшее положительное влияние на урожайность, как правило, отмечали в условиях стресса на средне- и сильноэродированных почвах. Эффективность азобактерина на яровом ячмене сорта Стратус и озимой ржи сорта Пламя в среднем составила 4.6% на неэродированной почве, 5.6% и 6.5% на слабо- и среднеэродированных дерново-подзолистых почвах на лессовидных суглинках; на озимой пшенице Богатка – 5.0, 5.5 и 5.6% на водоразделе, средне- и сильноэродированных дерново-подзолистых на лессовидных суглинках; на моренных суглинках – 5.9, 5.3 и 7.9% соответственно. Эффективность калипланта на яровой пшенице на дерново-подзолистой почве на лессовидных суглинках составила: на водоразделе – 11.4%, средне- и сильноэродированных почвах – 11.5 и 16.4%; на моренных суглинках на водоразделе – 8.3%, средне- и сильноэродированной почвах – 8.5 и 14.0%.

Азобактерин повышал содержание и сбор сырого протеина в зерне ярового ячменя сорта Стратус на 2.0–2.6% и 1.2–1.6 ц/га, в зерне озимой ржи сорта Пламя – на 1.1–1.8% и 0.7–1.0 ц/га соответственно. Калиплант не оказывал влияния на содержание белка в зерне яровой пшеницы, однако при разных способах его внесения отмечено улучшение качества белка за счет повышения содержания критических (Lys*, Thr* и Met*) и незаменимых (Val, Phe, Ile, Leu) аминокислот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черныш А.Ф., Лапа В.В., Касьянчик С.А., Юхновец А.В., Устинова А.М., Дубовик А.Э., Чижиков Ю.А., Мандрик М.Л., Аношко В.С., Качков Ю.П. Проектирование противоэрозионных комплексов и использование эрозионно опасных земель в разных ландшафтных зонах Беларуси. Рекомендации. Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии НАН Беларуси, 2005. 52 с.
2. Черныш А.Ф., Качков Ю.П., Касьяненко И.И. Экологически безопасное использование земель холмисто-моренных ландшафтов Белорусского Поозерья // Природн. ресурсы. 2003. № 2. С. 21–36.
3. Косинова Л.Ю., Гантимурова Н.И., Танасиенко А.А. Влияние эрозии на микробные сообщества черноземов Западной Сибири // Почвоведение. 1993. № 8. С. 72–80.
4. Михайловская Н.А., Черныш А.Ф., Погирницкая Т.В., Юхновец А.В. Ферментативная активность эродированных дерново-подзолистых почв на мощных моренных суглинках // Почвовед. и агрохим. 2013. № 2 (51). С. 123–133.
5. Danneberg G., Kronenberg A., Neuer G. and Bothe H. Aspects of nitrogen fixation and denitrification by *Azospirillum* // Plant Soil. 1986. V. 90. P. 193–202.
6. Bothe H., Klein B., Stephan M.P., Dobereiner J. Transformations of inorganic nitrogen by *Azospirillum* spp. // Arch. Microbiol. 1981. V. 130. P. 96–100.

7. Steenhoudt O., Vanderleyden J. *Azospirillum*, a free-living nitrogen-fixing bacterium closely associated with grasses: genetic, biochemical and ecological aspects // FEMS Microbiol. Rev. 2000. V. 24. Iss. 4. P. 487–506.
8. Zimmer W., Roeben K., Bothe H. An alternative explanation for plant growth promotion by bacteria of the genus *Azospirillum* // Planta. 1988. V. 176. P. 333–342.
9. Sarig S., Blum A., Okon Y. Improvement of the water status and yield of field grown grain sorghum (*Sorghum bicolor*) by inoculation with *Azospirillum brasilense* // J. Agric. Sci. Camb. 1988. V. 110. P. 271–277.
10. Михайловская Н.А., Миканова О., Барашенко Т.Б., Барашенко Т.В. Активность фосфатмобилизации у ризобактерий // Почвовед. и агрохим. 2007. № 1 (38). С. 225–231.
11. Нестеренко В.Н., Карягина Л.А., Барашенко Т.Б., Михайловская Н.А., Курилович Н.Н., Мороз Г.В. Штамм ассоциативных азотфиксирующих бактерий *Azospirillum brasilense* В-4485 для обработки семян зерновых культур и многолетних злаковых трав: Пат. 4632, РБ / А.Б. 2002. № 3. С. 90.
12. Аристовская Т.В. Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука, 1980. 187 с.
13. Bennett P.C. Quartz dissolution in organic rich aqueous system // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. P. 1781–1797.
14. Welch S.A., Ullman W.J. The effect of soluble organic acids on feldspar dissolution rates and stoichiometry // Geochim. Cosmochim. Acta. 1993. V. 57. P. 2725–2736.
15. Михайловская Н.А. Количественная оценка активности калиймобилизирующих бактерий и их эффективность на посевах озимой ржи // Весці НАН Беларусі. Сер. аграр. навук. 2006. № 3. С. 41–46.
16. Mikhailouskaya N., Tchernysh A. K-mobilizing bacteria and their effect on wheat yield // Agronomijas vestis (Latv. J. Agron.). 2005. V. 8. P. 147–150.
17. Михайловская Н.А., Богдевич И.М., Журавлева О.В., Барашенко Т.Б., Курилович Н.Н., Дюсова С.В. Штамм бактерий *Vacillus circulans* БИМ В-376Д для бактериализации семян зерновых культур: Пат. 9646, РБ // А.Б. 2007. № 4 (57). С. 112.
18. Егоров Н.С. Руководство к практическим занятиям по микробиологии. М.: Изд-во МГУ, 1995. 217 с.
19. Богдевич И.М., Лапа В.В., Босак В.Н., Ивахненко Н.Н., Шмигельская И.Д., Пуятин Ю.В. Рекомендации по определению биологической ценности белка сельскохозяйственных культур. Минск, 2005. С. 13–15.
20. Нестеренко В.Н. Использование ассоциативных микроорганизмов для повышения урожайности ячменя и многолетних злаковых трав: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Минск, 1993. 23 с.
21. Bashan Y., Levanony H., Ziv-Vecht O. The fate of field-inoculated *Azospirillum brasilense* Cd in wheat rhizosphere during the growing season // Can. J. Microbiol. 1987. V. 33. P. 1074–1079.
22. Bashan Y. Short exposure to *Azospirillum brasilense* Cd inoculation enhanced proton efflux of intact wheat roots // Can. J. Microbiol. 1990. V. 36. P. 419–425.
23. Okon Y., Kapulnik Y. Development and function of *Azospirillum*-inoculated roots // Plant Soil. 1986. V. 90. P. 3–16.
24. Михайловская Н.А., Барашенко Т.Б., Погирницкая Т.В., Дюсова С.В. Бинарная композиция *A. brasilense* + *V. circulans* и ее эффективность для инокуляции озимой пшеницы на эродированных дерново-подзолистых суглинистых почвах // Почвовед. и агрохим. 2017. № 1 (58). С. 187–199.
25. Boddy R.M., Dobreiner J. Nitrogen fixation associated with grasses and cereals: Recent progress and perspectives for future // Fertil. Res. 1995. V. 42. P. 241–250.
26. Bashan Y., Levanony H. Current status of *Azospirillum* inoculation technology: *Azospirillum* as a challenge for agriculture // Can. J. Microbiol. 1990. V. 36. P. 591–608.
27. Михайловская Н.А., Лученок Л.Н., Курилович Н.Н., Дюсова С.В., Журавлева О.В. Влияние силикатных бактерий на развитие проростков ячменя и пшеницы // Почвенные исследования и применение удобрений. 2003. Вып. 27. С. 316–324.

Efficiency of Biofertilizers Azobacterin and Kaliplant for Grain Crops Growing on Eroded Sod-Podzolic Soils

V. V. Lapa^a, N. A. Mikhailouskaya^{a,#}, S. A. Kasyanchyk^a, N. N. Tsybulko^a, and T. B. Barashenko^a

^a Belarusian Research Institute for Soil Science and Agrochemistry
ul. Kazintsya 62, Minsk 220108, Belarus

[#]E-mail: bionf1@yandex.ru

Adaptation of plants is of importance under growing in stress conditions on eroded soils. Application of biofertilizers azobacterin and kaliplant lead to the improvement of plant adaptive potential as a result of direct stimulation effect (phytohormons, plant nutrition improvement) as well as indirect influence (biological control of phytopatogens). Additive impact of azobacterin and kaliplant on plant growth and nutrition provided crop yields and crop quality increase on eroded soddy-podzolic soils. As a rule the largest positive effect on crop yield was observed in stress conditions on moderately and severely eroded soils. Azobacterin application resulted in the increase of crude protein content in grain of spring barley and winter rye. Kaliplant application resulted in the increase of critical and indispensable amino acids contents in spring wheat protein.

Key words: azobacterin, kaliplant, adaptation, eroded sod-podzolic loamy soil and crops.