

УДК 633.11:[631.445.24:631.82]

*Н. А. МИХАЙЛОВСКАЯ, А. Ф. ЧЕРНЫШ, С. А. КАСЬЯНЧИК, Т. Б. БАРАШЕНКО,
Е. Г. ТАРАСЮК, Т. В. ПОГИРНИЦКАЯ, С. В. ДЮСОВА*

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ПШЕНИЦЫ НА ЭРОДИРОВАННЫХ ПОЧВАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФОСФАТМОБИЛИЗУЮЩЕГО ИНОКУЛЯНТА

Институт почвоведения и агрохимии, Минск, Беларусь, e-mail: bionf1@yandex.ru

В полевом эксперименте на дерново-подзолистых почвах на моренных суглинках установлено, что применение фосфатмобилизующего инокулянта повышало урожайность яровой и озимой пшеницы на разных элементах склона: водоразделе, средне- и сильноэродированных почвах. Повышение урожайности обусловлено полифункциональностью микробного инокулянта, сочетающего свойства регулятора роста, биоудобрения и биопестицида. Установлены количественные показатели влияния фосфатмобилизующего инокулянта на урожайность и фитопатологическое состояние посевов.

Ключевые слова: фосфатмобилизующий инокулянт, дерново-подзолистые почвы на моренных суглинках, степень эродированности, яровая и озимая пшеница, урожайность, гелиминтоспорозная корневая гниль.

*N. A. MIKHAILOVSKAYA, A. F. CHARNYSH, S. A. KASYANCHIK, T. B. BARASHENKA, E. G. TARASYUK,
T. V. POGIRNITSKAYA, S. V. DYUSOVA*

POTENTIAL FOR INCREASING THE YIELD OF WHEAT ON ERODED SOILS USING PHOSPHORUS-SOLUBILIZING INOCULANT

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Minsk, Belarus, e-mail: bionf1@yandex.ru

The field experiment data show that application of phosphorus-solubilizing inoculant increases spring wheat and winter wheat yields at different slope elements – watershed, medium and severely eroded soils. The yield increase is caused by multifunctionality of phosphorus-solubilizing inoculant which possesses the properties of plant growth promoter, biofertilizer and biopesticide as well. Quantitative parameters of the influence of phosphorus-solubilizing inoculant on the yield and phytopathological state of crops are presented.

Key words: phosphorus-solubilizing inoculant, Luvisol loamy sand soil on morain loam, erosion degree, wheat, yield, *Helminthosporium* root rot.

Введение. Исследования по биологической фосфатмобилизации активно проводятся во многих странах, разрабатываются микробные инокулянты для улучшения фосфатного питания сельскохозяйственных культур [1–3]. Фосфор – второй по значимости элемент питания растений, регулирует формирование урожая и его качество [4, 5]. Актуальность поиска дополнительных источников фосфатного питания обусловлена также высокой стоимостью фосфорных удобрений, сравнительно невысоким коэффициентом использования фосфора и ограниченными запасами фосфатного сырья.

Интерес к применению фосфатмобилизующих инокулянтов обусловлен, прежде всего, увеличением подвижности трудно растворимых почвенных фосфатов, так как доступные для питания растений формы составляют только 1–5 % от общего содержания фосфора в почве [2]. В известкованных дерново-подзолистых почвах преобладают нерастворимые трехкальциевые фосфаты, внесенный в почву суперфосфат также сравнительно быстро переходит в длительно сохраняющийся трехкальциевый фосфат [5].

В цикле фосфора микроорганизмам принадлежит ключевая роль (благодаря их способности растворять неорганические фосфаты, а также мобилизовать фосфор, входящий в состав органических соединений) [3]. Способность к растворению минеральных фосфатов обнаружена у широкого круга ризобактерий [2, 6–9] и микоризных грибов [10, 11]. Основную группу фосфатмо-

билизирующих бактерий составляют *Pseudomonas*, *Bacillus* и *Rhizobium* [2, 6], которые в настоящее время привлекают наибольшее внимание в качестве действующих агентов *P*-мобилизирующих инокулянтов [1, 3, 6].

На ранних стадиях органогенеза фосфатное питание имеет определяющее значение для развития корневой системы растений. Дефицит фосфора в этот период приводит к слабому развитию корневой системы, что снижает адаптивные возможности сельскохозяйственных культур и негативно влияет на их урожайность. Подкормки в более поздние сроки вегетации не компенсируют недостаток фосфора в критические периоды, на начальных этапах развития растений [4]. Применение фосфатмобилизирующих бактерий может способствовать устранению дефицита фосфора, в особенности в начале вегетации растений.

В Институте почвоведения и агрохимии также проводятся исследования по изучению закономерностей микробной фосфатмобилизации и оценке эффективности применения фосфатмобилизирующих инокулянтов на зерновых культурах. Полученные нами изоляты фосфатмобилизирующих бактерий (*Pseudomonas* sp.) характеризуются комплексом полезных свойств. Количественно определена их способность к мобилизации труднодоступных минеральных форм почвенного фосфора [7], установлено существенное гормональное действие на инокулированные растения [7, 13], показана способность фосфатмобилизирующих бактерий к биоконтролю [13]. Наличие различных приспособительных механизмов у изолятов фосфатмобилизирующих бактерий нашей коллекции позволяет прогнозировать их разностороннее положительное действие на продукционный процесс и урожайность зерновых культур.

По данным наших исследований, наибольший эффект от бактериальных удобрений, как правило, отмечается в стрессовых условиях. На дерново-подзолистой супесчаной почве в полевом эксперименте, моделирующем разную обеспеченность подвижным фосфором, наибольшую отдачу от фосфатмобилизирующих инокулянтов регистрировали при дефиците подвижного фосфора в почве [13].

На территории республики актуально применение фосфатмобилизирующих инокулянтов на эродированных почвах, где растения подвержены стрессу не только в отношении дефицита фосфора, но и других элементов питания вследствие развития эрозионных процессов [12].

Цель настоящей работы – изучить эффективность фосфатмобилизирующих инокулянтов на посевах яровой и озимой пшеницы на эродированных дерново-подзолистых почвах на моренных суглинках; установить параметры их влияния на урожайность и фитопатологическое состояние посевов; определить основные факторы повышения урожайности при использовании фосфатмобилизирующих инокулянтов.

Объекты и методы исследований. Исследования по оценке эффективности фосфатмобилизирующих инокулянтов проводили на дерново-подзолистой почве, сформированной на мощных моренных суглинках в стационарном полевом опыте (СПК «Межаны», Браславский р-н). Стационар заложен по геоморфологическому профилю от водораздельной равнины до подножия склона. Повторность в опыте четырехкратная, общая площадь делянок на водоразделе – 50 м², на верхней и средней частях склона – 40 м², в нижней части склона – 30 м². Размеры учетных делянок: на водоразделе – 35 м², на верхней и средней частях склона – 30 м², в нижней части склона – 25 м².

Опыт развернут в двух полях. В 2011–2013 гг. возделывали яровую пшеницу сорта Тома и озимую пшеницу сорта Богатка. Агрохимическая характеристика пахотного слоя дерново-подзолистой почвы, сформированной на мощных моренных суглинках, представлена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Агрохимические показатели пахотного слоя дерново-подзолистой почвы на моренных суглинках, СПК «Межаны», 2011–2012 гг.

Почва	Гумус, %	рН	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
			мг/кг			
Неэродированная	2,06–2,10	6,2–6,3	260–280	175–185	1020–1050	283–290
Среднеэродированная	1,82–1,84	6,1–6,2	200–221	147–151	983–990	244–252
Сильноэродированная	1,51–1,56	6,0–6,1	165–177	123–127	925–940	231–240

Эффективность применения фосфатмобилизующего инокулянта изучали на водоразделе, средне- и сильноэродированной почвах на вариантах с разными системами удобрения – минеральной ($N_{70+20} P_{50} K_{120}$), органической (навоз, 30 т/га) и органоминеральной ($N_{70+20} P_{50} K_{120}$ + навоз). Исследования проводили в звене травяно-зернового севооборота со следующим чередованием культур: яровые зерновые, вико-овсяная смесь, озимые зерновые + многолетние травы, многолетние травы 1-го и 2-го г.п. Навоз вносили под зерновые культуры.

Жидкие концентрированные удобрения на основе изолятов фосфатмобилизующих бактерий собственной коллекции (*Pseudomonas* sp.) изготовлены в лабораторных условиях. Способ внесения фосфатмобилизующих инокулянтов – обработка посевов. Обработку посевов яровой пшеницы проводили в фазе всходы – начало кущения (титр $7,9 \cdot 10^8$ КОЕ/мл). Обработку озимой пшеницы – весной в фазе кущения (титр $1,2 \cdot 10^9$ КОЕ/мл). Состав рабочей смеси для обработки посевов из расчета на 1 га: 1 л жидкого бактериального удобрения + 150–200 л воды.

Для оценки способности фосфатмобилизующих бактерий к биологическому контролю проводили учет показателей распространения и развития гельминтоспорозной корневой гнили в фазу молочно-восковой спелости зерновых культур на 100 растениях, отобранных в 5 точках каждого варианта опыта. Выемку вместе с почвой раскладывали на бумаге, растения отряхивали, отмывали от почвы и помещали на 30 мин в воду, подсушивали и проводили учет. Интенсивность поражения исследуемых растений корневой гнилью оценивали в баллах по шкале ВИЗР [14].

Для расчета показателя распространения корневой гнили использовали следующую формулу:

$$P = (a \cdot 100) / N,$$

где P – распространение болезни, %; a – количество больных растений; N – общее число исследуемых растений.

Для расчета показателя степени поражения растений корневой гнилью использовали следующую формулу:

$$R = [\Sigma(ab) \cdot 100] / NK,$$

где R – развитие болезни, %; a – число пораженных растений; b – балл поражения; N – общее количество исследованных растений; K – высший балл шкалы степени развития болезни.

Результаты и их обсуждение. Исследования проводили в условиях Северной почвенно-экологической провинции. В этом регионе эрозия развивается в условиях мелко- и среднехолмистого рельефа на почвах, сформированных на моренных почвообразующих породах. Наряду с водной эрозией развивается также техногенная, обусловленная механической обработкой почвы. Эрозионно опасные почвы составляют здесь около 30 %, эродированные – около 11 % площади обрабатываемых земель [12]. Ухудшение агрофизических, агрохимических и биологических свойств эродированных почв приводит к снижению их производительной способности. Снижение урожайности зерновых культур может достигать 12–40 % в зависимости от степени их эродированности [12].

В связи с этим одной из актуальных задач при возделывании зерновых культур на эродированных почвах является повышение их адаптивного потенциала, в том числе за счет использования фосфатмобилизующих инокулянтов, активизирующих биологические механизмы стимуляции роста и улучшения минерального питания.

На протяжении трех лет исследований по изучению эффективности фосфатмобилизующего инокулянта (*Pseudomonas* sp.) на яровой пшенице сорта Тома и озимой пшенице сорта Богатка отмечали сходные зависимости урожайности культур от инокуляции, степени эродированности почвы и системы удобрения. Внесение фосфатмобилизующих бактерий путем обработки посевов приводило к повышению урожайности яровой и озимой пшеницы на водоразделе, средне- и сильноэродированной почвах при органической, минеральной и органоминеральной системах удобрения.

На всех элементах склона потенциальные возможности фосфатмобилизующего инокулянта лучше реализовались при органоминеральной системе удобрения, далее в убывающем порядке – при минеральной и органической системах удобрения (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Влияние фосфатмобилизующего инокулянта на урожайность пшеницы на эродированных дерново-подзолистых почвах на моренных суглинках, ОАО «Межаны», 2011–2013 гг.

Почва*	Яровая пшеница (2011 г.)			Озимая пшеница (2012 г.)			Озимая пшеница (2013 г.)		
	Контроль	Инокуляция	Прибавка	Контроль	Инокуляция	Прибавка	Контроль	Инокуляция	Прибавка
<i>Контроль</i>									
1	34,6	38,1	3,5	37,9	40,0	2,1	45,0	48,2	3,2
2	28,1	30,2	2,1	32,1	34,4	2,3	28,8	31,3	2,5
3	25,1	28,3	3,2	30,1	32,1	2,0	18,2	20,3	2,1
$N_{70+20}P_{50}K_{120}$									
1	38,7	44,0	5,3	44,2	47,7	3,5	64,6	67,7	3,1
2	34,0	38,6	4,6	34,4	36,8	2,4	30,6	33,0	2,4
3	33,6	38,4	4,8	34,3	36,9	2,6	20,5	22,4	1,9
<i>Навоз, 30 т/га</i>									
1	38,4	42,0	3,6	39,8	42,1	2,3	53,7	57,1	3,4
2	31,7	34,8	3,1	34,1	36,5	2,4	32,0	34,6	2,6
3	29,1	31,9	2,8	31,2	33,3	2,1	20,5	22,5	2,0
$N_{70+20}P_{50}K_{120} + \text{навоз}$									
1	44,2	51,0	6,8	45,2	48,8	3,6	66,2	69,8	3,6
2	37,2	42,5	5,3	37,6	41,0	3,4	34,8	37,9	3,1
3	36,5	42,9	6,4	36,5	39,4	2,9	25,7	28,0	2,3
НСР ₀₅	А (почва) 1,6 В (инокуляция) 1,8			А (почва) 2,7 В (инокуляция) 1,9			А (почва) 2,2 В (инокуляция) 1,6		

*Почва: 1 – водораздел, 2 – среднеэродированная почва, 3 – сильноэродированная почва.

Наиболее высокую урожайность и прибавки от внесения *P*-мобилизующих бактерий отмечали на водоразделе при разных системах удобрения: на яровой пшенице – 42,0–51,0 и 3,6–6,8 ц/га, озимой пшенице – 42,1–69,8 и 2,3–3,6 ц/га зерна соответственно. На эродированных почвах прибавки от инокуляции дифференцировались следующим образом: наиболее значимые при органической системе удобрения – 5,3–6,4 ц/га (яровая пшеница) и 2,3–3,4 ц/га (озимая пшеница), далее при минеральной – 4,6–4,8 и 1,9–2,6 ц/га, и при органической – 2,8–3,1 и 2,0–2,6 ц/га системах удобрения соответственно (см. табл. 2).

Рассматривая возможные факторы положительного влияния *P*-мобилизующих бактерий на урожайность пшеницы, можно предположить, что на водоразделе, где отмечена достаточная обеспеченность подвижным фосфором – в пределах 260–280 мг/кг, наиболее вероятно преобладание гормонального действия бактериального инокулянта. Ранее нами были установлены количественные параметры влияния фосфатмобилизующих бактерий на развитие пшеницы на ранних этапах онтогенеза: за счет инокуляции объем корней увеличивался на 14–30 %, биомасса корней – на 11–32 %, биомасса надземной части растения – на 6–19 % по сравнению с контролем без инокуляции [7, 13]. Инокулированные растения отличались более развитой корневой системой, что повышало их адаптивные возможности в отношении минерального и водного питания на эродированных почвах.

По литературным данным изменение морфологии корней, увеличение их массы и объема, числа латеральных корней и корневых волосков, наблюдающееся в результате инокуляции, указывает на продукцию регуляторов роста интродуцированными микроорганизмами [6, 11, 15–19].

Стимуляция развития корневой системы – наиболее часто регистрируемый эффект от инокуляции. Возможно, он является и наиболее значимым для повышения урожайности пшеницы на эродированных почвах, так как более развитая корневая система обеспечивает увеличение общей поглощающей поверхности корней и соответствующую интенсификацию потребления элементов минерального питания и воды.

На среднеэродированных почвах, где содержание P_2O_5 снижается до 200–221 мг/кг, и на сильноэродированных почвах при еще более значимом снижении содержания P_2O_5 – до 165–177 мг/кг (см. табл. 1), повышение урожайности пшеницы может быть связано также с усилением микробной мобилизации фосфора из труднодоступных форм. Это согласуется с экспериментальными данными, полученными нами при испытании фосфатмобилизующих бактерий в полевых опытах, моделирующих разную обеспеченность дерново-подзолистой супесчаной почвы подвижными фосфатами, где наблюдали обратную зависимость эффективности инокуляции от содержания подвижного фосфора в почве [7, 13].

Таким образом, можно привести количественные показатели влияния фосфатмобилизующего инокулянта на урожайность пшеницы: наиболее высокая урожайность и прибавки от инокуляции посевов получены на водоразделе: на яровой пшенице – 42,0–51,0 и 3,6–6,8 ц/га, на озимой пшенице – 42,1–69,8 и 2,3–3,6 ц/га зерна соответственно в зависимости от системы удобрений. На эродированных почвах прибавки от инокуляции зависели от системы удобрения: наибольшие получены при органоминеральной системе удобрения – 5,3–6,4 ц/га (яровая пшеница) и 2,3–3,4 ц/га (озимая пшеница), затем при минеральной – 4,6–4,8 и 1,9–2,6 ц/га, и при органической – 2,8–3,1 и 2,0–2,6 ц/га системах удобрения соответственно (см. табл. 2). На водоразделе при достаточной обеспеченности подвижным фосфором (260–280 мг/кг) наиболее вероятно преобладание гормонального действия фосфатмобилизующего инокулянта, на средне- и сильноэродированных почвах при дефиците подвижного фосфора повышение урожайности пшеницы может быть обусловлено не только гормональным эффектом, но и усилением микробной мобилизации фосфора из труднодоступных форм.

Одной из задач исследований было изучение способности фосфатмобилизующего инокулянта к биоконтролю. Способность контролировать болезни растений, вызываемые грибковыми или бактериальными патогенами, также может быть фактором положительного влияния интродуцированных бактерий на урожайность зерновых культур. По литературным данным фосфатмобилизующие бактерии, относящиеся к р. *Pseudomonas*, оказывают фунгистатическое действие на корневые гнили [15, 20, 21]. К настоящему времени доказано, что механизмы, ответственные за биоконтроль, могут включать конкуренцию за элементы питания, за экологическую нишу, а также приобретенную системную устойчивость или экскрецию антифунгальных метаболитов [20, 21]. Основные агенты биоконтроля, типичные для представителей р. *Pseudomonas*, охарактеризованы на молекулярном уровне [22, 23]. Недавно открыты новые классы химических соединений, ответственных за биоконтроль у *Pseudomonas* sp., – это циклические липопептиды [24, 25]. Генетические основы биосинтеза агентов биоконтроля у представителей р. *Pseudomonas* достаточно хорошо выяснены.

В 2011–2013 гг. проведена оценка фитопатологического состояния посевов яровой и озимой пшеницы в отношении распространения и развития гельминтоспоровидной корневой гнили. Экспериментальные данные подтвердили, что вклад фосфатмобилизующих бактерий в повышение урожайности пшеницы обусловлен также их фунгистатическим действием на корневую гниль. Интродуцированные бактерии способны контролировать распространение и развитие болезни и оказывать фунгистатическое действие на деятельность грибковых фитопатогенов за счет антагонизма. Выживание интродуцированных микроорганизмов в конкурентных условиях ризоплана и ризосферы связано с биосинтезом антимикробных метаболитов.

Учет распространения и развития корневой гнили в посевах яровой пшеницы показал, что наиболее существенно фунгистатическое действие *P*-мобилизующих бактерий проявлялось на сильно- и среднеэродированной почвах – распространение болезни снижалось на 4,0 и 3,8 % соответственно при органоминеральной системе удобрения (табл. 3). Наибольший эффект на показатели развития болезни наблюдали также на сильноэродированной почве – снижение составило 3,6 и 3,8 % при органоминеральной и минеральной системах удобрения соответственно; на других элементах склона указанные показатели снижались на 2,2–2,8 %.

Т а б л и ц а 3. Влияние фосфатмобилизующего инокулянта на распространение и развитие гельминтоспорозной корневой гнили в посевах яровой пшеницы, ОАО «Межаны», 2011 г., %

Вариант опыта	Почва					
	неэродированная		среднеэродированная		сильноэродированная	
	Распространение	Развитие	Распространение	Развитие	Распространение	Развитие
<i>Контроль</i>						
Контроль	20,4	5,5	23,9	5,9	25,4	6,4
Инокуляция	18,5	4,2	22,0	4,0	22,8	4,2
Снижение	1,9	1,3	1,9	1,9	2,6	2,2
<i>N₇₀₊₂₀P₅₀K₁₂₀</i>						
Контроль	25,2	6,0	26,3	6,8	26,8	8,2
Инокуляция	22,8	3,8	23,5	4,2	23,6	4,4
Снижение	2,4	2,2	2,8	2,6	3,2	3,8
<i>Навоз, 30 т/га</i>						
Контроль	27,3	6,9	28,0	7,8	29,5	9,5
Инокуляция	25,3	5,4	25,9	6,0	26,7	7,3
Снижение	2,0	1,5	2,1	1,8	2,8	2,2
<i>N₇₀₊₂₀P₅₀K₁₂₀ + навоз</i>						
Контроль	31,7	7,1	32,2	8,6	35,6	12,8
Инокуляция	28,5	4,7	28,4	5,8	31,6	9,2
Снижение	3,2	2,4	3,8	2,8	4,0	3,6
НСР ₀₅	1,3	0,4	1,3	0,4	1,3	

Оценка фунгистатического действия *P*-мобилизующего инокулянта в посевах озимой пшеницы в 2012–2013 гг. также показала снижение степени поражения растений корневой гнилью на всех элементах склона и при всех изученных системах удобрения. Наиболее существенный фунгистатический эффект отмечен при органоминеральной системе удобрения ($N_{70+20}P_{50}K_{120} + 30$ т/га навоза). Под действием инокуляции посевов распространение болезни на сильноэродированной почве снижалось на 4,5 % в 2012 г. и на 4,8 % в 2013 г., на водоразделе и среднеэродированной почве снижение показателя составило 3,4 и 3,6 % в 2012 г., 2,9 и 3,9 % в 2013 г. При минеральной и органической системах удобрения снижение распространения болезни в 2012 г. составило 3,0–3,4 и 2,2–3,4 %, в 2013 г. – 3,1–4,0 и 2,9–3,8 % соответственно по всем элементам склона (табл. 4).

Внесение фосфатмобилизующих бактерий способствовало также снижению показателей развития корневой гнили озимой пшеницы. Фунгистатическое действие *P*-мобилизующего инокулянта было наиболее выражено на сильноэродированной почве при минеральной ($N_{70+20}P_{50}K_{120}$) и органоминеральной ($N_{70+20}P_{50}K_{120} + 30$ т/га навоза) системах удобрения. Инокуляция посевов сдерживала развитие болезни на фоне $N_{70+20}P_{50}K_{120}$ в 2012 г. на 4,5 % и в 2013 г. на 4,9 % на сильноэродированной почве; при органоминеральной системе удобрения показатели снижения развития болезни на сильноэродированной почве в 2012 г. составили 4,3 % и в 2013 г. 5,4 % (табл. 5).

Как правило, микробные инокулянты не способны к полному уничтожению популяции фитопатогена, но они ограничивают их распространение и развитие, снижая негативное влияние на урожайность культур.

Обобщая трехлетние данные, можно привести количественные показатели влияния фосфатмобилизующего инокулянта на фитопатологическое состояние посевов озимой и яровой пшеницы на разных элементах склона. Диапазоны снижения пораженности посевов гельминтоспорозной корневой гнилью на водоразделе (по развитию болезни): на яровой пшенице – на 1,5–2,4 %, на озимой пшенице – на 2,5–3,3 % (2012 г.) и 3,0–3,7 % (2013 г.). Диапазоны снижения развития болезни на сильноэродированных почвах: на яровой пшенице – на 2,2–3,8 %, на озимой пшенице – на 3,1–4,5 % (2012 г.) и 4,3–5,4 % (2013 г.). В стрессовых условиях, на сильноэродированных почвах, фунгистатический эффект от фосфатмобилизующего инокулянта повышается (табл. 6).

Т а б л и ц а 4. Влияние фосфатмобилизующего инокулянта на распространение гельминтоспорозной корневой гнили в посевах озимой пшеницы, ОАО «Межаны», 2012–2013 гг.

Вариант опыта	2012 г.			2013 г.		
	Почва*					
	1	2	3	1	2	3
<i>Контроль</i>						
Контроль	34,4	35,8	34,5	30,9	32,5	31,1
Инокуляция	31,6	32,9	31,3	28,0	29,3	27,7
Снижение	2,8	2,9	3,2	2,9	3,2	3,4
$N_{70+20}P_{50}K_{120}$						
Контроль	35,8	36,2	38,8	32,2	33,0	38,8
Инокуляция	32,6	33,2	35,4	29,1	29,5	34,8
Снижение	3,2	3,0	3,4	3,1	3,5	4,0
<i>Навоз, 30 т/га</i>						
Контроль	36,2	36,4	38,3	32,8	32,7	34,8
Инокуляция	33,6	34,2	34,9	29,9	30,4	31,0
Снижение	2,6	2,2	3,4	2,9	2,3	3,8
$N_{70+20}P_{50}K_{120} + \text{навоз, 30 т/га}$						
Контроль	36,3	38,2	38,4	32,0	34,4	34,9
Инокуляция	32,9	34,6	33,9	29,1	30,5	30,1
Снижение	3,4	3,6	4,5	2,9	3,9	4,8
НСР ₀₅	1,7			1,4		

*Почва: 1 – водораздел, 2 – среднеэродированная почва, 3 – сильноэродированная почва.

Т а б л и ц а 5. Влияние фосфатмобилизующего инокулянта на развитие гельминтоспорозной корневой гнили в посевах озимой пшеницы, ОАО «Межаны», 2012–2013 гг.

Вариант опыта	2012 г.			2013 г.		
	Почва*					
	1	2	3	1	2	3
<i>Контроль</i>						
Контроль	8,2	9,5	10,3	6,9	8,3	8,9
Инокуляция	6,7	7,1	7,7	5,1	5,5	5,7
Снижение	1,5	2,4	2,6	1,8	2,8	3,2
$N_{70+20}P_{50}K_{120}$						
Контроль	9,3	10,8	14,3	8,0	9,2	12,5
Инокуляция	6,4	7,5	9,8	4,9	5,2	7,6
Снижение	2,9	3,3	4,5	3,1	4,0	4,9
<i>Навоз, 30 т/га</i>						
Контроль	10,5	13,2	15,4	9,0	12,6	13,8
Инокуляция	8,0	10,5	12,3	6,0	8,3	9,5
Снижение	2,5	2,7	3,1	3,0	4,3	4,3
$N_{70+20}P_{50}K_{120} + \text{навоз}$						
Контроль	12,8	14,8	16,6	11,2	13,2	14,2
Инокуляция	9,5	11,3	12,3	7,5	8,4	8,8
Снижение	3,3	3,5	4,3	3,7	4,8	5,4
НСР ₀₅	0,5			0,34		

*Почва: 1 – водораздел, 2 – среднеэродированная почва, 3 – сильноэродированная почва.

Т а б л и ц а 6. Параметры влияния *P*-мобилизующего инокулянта на урожайность и фитопатологическое состояние посевов озимой и яровой пшеницы на дерново-подзолистых почвах на моренных суглинках, ОАО «Межаны», 2011–2013 гг.

Культура, год	Водораздел				Сильноэродированная почва			
	Урожайность	Прибавка	Снижение, % (корневая гниль)		Урожайность	Прибавка	Снижение, % (корневая гниль)	
	ц/га		распростра- нение	развитие	ц/га		распростра- нение	развитие
Яровая пшеница, 2011 г.	42,0–51,0	3,6–6,8	2,0–3,2	1,5–2,4	31,9–42,9	2,8–6,4	2,8–4,0	2,2–3,8
Озимая пшеница, 2012 г.	42,1–48,8	2,3–3,6	2,6–3,4	2,5–3,3	33,3–39,4	2,1–2,9	3,4–4,5	3,1–4,5
Озимая пшеница, 2013 г.	57,1–69,8	3,1–3,6	2,9–3,1	3,0–3,7	22,4–28,0	1,9–2,3	3,8–4,8	4,3–5,4

П р и м е ч а н и е. Урожайность и прибавки зерна, диапазоны снижения распространения и развития корневой гнили даны при разных системах удобрения (минеральной, органической, органоминеральной).

Таким образом, результаты исследований показали, что применение фосфатмобилизующих инокулянтов позволяет повышать урожайность яровой и озимой пшеницы на разных элементах склона. Наиболее высокая урожайность и прибавки от инокуляции посевов получены на водоразделе, на средне- и сильноэродированных почвах эти показатели были несколько ниже. По всей почвенно-эрозионной катене потенциальные возможности инокулянта лучше реализовались при органоминеральной системе удобрения. Основными факторами положительного действия инокулянта на урожайность яровой и озимой пшеницы являются гормональный эффект, обеспечивающий повышение адаптивного потенциала растений, увеличение подвижности труднодоступных почвенных фосфатов за счет микробной мобилизации и фунгистатическое действие на гельминтоспорозную корневую гниль. Вклад перечисленных факторов в повышение урожайности может варьировать в зависимости от фазы развития растений, степени эродированности и агрохимических свойств почвы, системы удобрения, гидротермических условий. Внесение фосфатмобилизующих инокулянтов рассматривается как дополнительный резерв повышения урожайности яровой и озимой пшеницы на эродированных почвах. Применение микробных инокулянтов на основе природных штаммов микроорганизмов экологически обосновано, они безопасны для человека и окружающей среды.

Заключение. Обработка посевов фосфатмобилизующим инокулянтom – перспективный элемент биологизации возделывания яровой и озимой пшеницы, повышающий урожайность на разных элементах склона на дерново-подзолистых почвах на моренных суглинках. Потенциал *P*-мобилизующих бактерий лучше реализуется при органоминеральной системе удобрения. Повышение урожайности обусловлено полифункциональностью микробного инокулянта, сочетающего свойства регулятора роста, биоудобрения и биопестицида, что обеспечивает повышение адаптивного потенциала и улучшение питания растений, а также снижение распространения и развития гельминтоспорозной корневой гнили в посевах яровой и озимой пшеницы.

Установлены количественные показатели влияния фосфатмобилизующего инокулянта на урожайность и фитопатологическое состояние посевов яровой и озимой пшеницы. Наибольший эффект от интродукции *P*-мобилизующих бактерий получен на водоразделе: урожайность яровой пшеницы – 42,0–45,0 ц/га, прибавки зерна – 3,6–6,8 ц/га, озимой пшеницы – 42,1–48,8 и 2,3–3,6 ц/га (2012 г.), 57,1–69,8 и 3,1–3,6 ц/га (2013 г.). На сильноэродированной почве урожайность яровой пшеницы составила 31,9–42,9 ц/га, прибавки – 2,8–6,4 ц/га, озимой пшеницы – 33,3–39,4 и 2,1–2,9 ц/га (2012 г.), 22,4–28 и 1,9–2,3 ц/га (2013 г.). Показатели снижения развития гельминтоспорозной корневой гнилью составили на водоразделе: на яровой пшенице – на 1,5–2,4 %, на озимой пшенице – на 2,5–3,3 % (2012 г.) и 3,0–3,7 % (2013 г.); на сильноэродированных почвах: на яровой пшенице – на 2,2–3,8 %, на озимой пшенице – на 3,1–4,5 % (2012 г.) и 4,3–5,4 % (2013 г.). В стрессовых условиях, на сильноэродированных почвах, фунгистатический эффект от фосфатмобилизующих бактерий повышается.

Список использованных источников

1. Khan, M.S. Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture / M.S. Khan, A. Zaidi. P.A. Wani // *Agron. Sustain. Dev.* – 2007. – Vol. 27. – P. 29–43.
2. Novel approaches for analysis of biodiversity of phosphate-solubilizing bacteria / M.-H. Ramirez-Bahena [et al.] // *Phosphate Solubilizing Microbes for Crop Improvement* / Nova Science Publishers; eds. M.S. Khan, A. Zaidi. – 2009. – P. 15–40.
3. Gaur, A.C. Phosphate solubilizing microorganisms as biofertilizers / A.C. Gaur // New Delhi: Omega Sci. Publishers. – 1990. – 283 p.
4. Богдевич, И.М. Фосфорные удобрения в сельском хозяйстве важны и незаменимы / И.М. Богдевич, В.В. Лапа // *Земляробства і ахова раслін.* – 2004. – №2. – С. 24–25.
5. Синягин, И.И. Превращения фосфорных и калийных удобрений в почве и повышение их усвояемости / И.И. Синягин / МСХ СССР, ВНИИТИ. – М.: 1969. – С. 6–24.
6. Rodriguez, H. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion / H. Rodriguez, R. Fraga // *Biotechnol. Adv.* – 1999. – Vol. 17. – P. 319–339.
7. Свойства фосфатмобилизующих бактерий и их влияние на урожайность зерновых культур на дерново-подзолистых супесчаных почвах / Н.А. Михайловская [и др.] // *Почвоведение и агрохимия.* – 2011. – №2(47). – С. 120–129.
8. Геллер, И.Т. Мобилизация нерастворимых минеральных соединений почвенными микроорганизмами: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.07 / И.Т. Геллер / ТСХА. – М., 1971. – 17 с.
9. Goldstein, A.H. Bacterial solubilization of mineral phosphates: Historical perspective and future prospects / A.H. Goldstein // *Am. J. Alternative Agric.* – 1986. – N1. – P. 51–57.
10. Khurana, A.L. Role of vesicular-arbuscular mycorrhizae (VAM) in sustainable agriculture / A.L. Khurana, S.S. Dudeja // *Proc. Seminar on National Resource Management.* – 1995. – P. 37–45.
11. Whitelaw, M.A. Growth promotion of plants inoculated with phosphate solubilizing fungi / M.A. Whitelaw // *Adv. Agron.* – 2000. – Vol. 69. – P. 99–151.
12. Проектирование противоэрозионных комплексов и использование эрозионно-опасных земель в разных ландшафтных зонах Беларуси: рекомендации / А.Ф. Черныш, В.В. Лапа, С.А. Касьянчик, А.В. Юхновец, А.М. Устинова, А.Э. Дубовик, Ю.А. Чижиков, М.Л. Мандрик, В.С. Аношко, Ю.П. Качков / *Ин-т почвоведения и агрохимии НАН Беларуси; под общ. ред. А.Ф. Черныша.* – Минск, 2005. – 52 с.
13. Влияние фосфатмобилизующих бактерий на ростовые процессы, урожайность и фитосанитарное состояние посевов зерновых культур на дерново-подзолистых супесчаных почвах / Н.А. Михайловская [и др.] // *Почвоведение и агрохимия.* – 2012. – №1(48). – С. 136–149.
14. Практикум по защите растений / Н.Г. Берим [и др.]. – Л.: Колос, 1980. – 247с.
15. Bloemberg, Guido V. Molecular basis of plant growth promotion and biocontrol by rhizobacteria / Guido V. Bloemberg, Ben J.J. Lugtenberg // *Current Opinion in Plant Biology.* – 2001. – Vol. 4. – P. 343–250.
16. Mikanová, O. Phosphorus Solubilizing Microorganisms and their Role in Plant Growth Promotion / O. Mikanová, J. Kubát // *Microbial Biotechnology in Agriculture and Aquaculture (ISBN: 1-57808-443-1)* / Science Publishers; eds. R. C. Ray. – 2006. – Vol. II. – P. 111–145.
17. Gibberellin production and phosphate solubilization by newly isolated strain of *Acinetobacter calcoaceticus* and its effect on plant growth / S.M. Kang [et al.] // *Biotechnol. Letters.* – 2007. – Vol. 31. – P. 277–281.
18. Okon, Y. Development and function of *Azospirillum*-inoculated roots / Y. Okon, Y. Kapulnik // *Plant Soil.* – 1986. – Vol. 90. – P. 3–16.
19. Kapulnik, Y. Changes in root morphology of wheat caused by *Azospirillum* inoculation / Y. Kapulnik, Y. Okon, Y. Henis // *Can. J. Microbiol.* – 1985. – Vol. 31. – P. 881–887.
20. Duffy, B. Environmental factors modulating antibiotic and siderophore biosynthesis by *Pseudomonas fluorescens* biocontrol strain / B. Duffy, G. Defago // *Appl. Environ. Microbiol.* – 1999. – Vol. 65. – P. 2429–2438.
21. Van Loon L.C. Systematic resistance induced by rhizosphere bacteria / L.C. Van Loon, P.A.H.M., Bakker, C.M.J. Pieterse // *Annu. Rev. Phytopathol.* – 1998. – Vol. 36. – P. 452–483.
22. Bangera, M.G. Identification and characterization of a gene cluster for synthesis of the polyketide antibiotic 2,4-diacetylphloroglucinol from *Pseudomonas fluorescens* Q2-87. / M.G. Bangera, I.S. Thomashow // *J. Bacteriol.* – 1999. – Vol. 181. – P. 3155–3163.
23. Characterization of the pyolutcorin biosynthetic gene cluster of *Pseudomonas fluorescens* Pf5. / B. Nowak-Thompson [et al.] // *J. Bacteriol.* – 1999. – Vol. 181. – P. 2166–2174.
24. Nielsen, T.H. Viscozinamide, a new cyclic depsipeptide with surfactant and antifungal properties produced by *Pseudomonas fluorescens* DR54. / T.H. Nielsen // *J. Appl. Microbiol.* – 1999. – Vol. 87. – P. 80–90.
25. Viscozinamide-producing Structure, production characteristics and fungal antagonism of tensin – a new cyclic lipopeptide from *Pseudomonas fluorescens* strain 96.578. / C. Thrane [et al.] // *J. Appl. Microbiol.* – 2000. – Vol. 89. – P. 992–1001.

Поступила в редакцию 17.07.2015