

УДК 631.461.5:631.41

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЗОТФИКСИРУЮЩЕЙ БАКТЕРИИ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ РАСТЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ПОЧВЕННЫХ УСЛОВИЯХ¹

© 2020 г. В. П. Шабает

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

E-mail: VPSH@rambler.ru

Поступила в редакцию 06.03.2020 г.

После доработки 17.03.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

Эффективность применения стимулирующих рост растений ризосферных бактерий, в том числе азотфиксирующих, на различных почвах исследована недостаточно. В связи с этим изучено влияние стимулирующей рост столовой свеклы азотфиксирующей бактерии *Pseudomonas putida* 23 на урожай в микрополевых опытах на фоне внесения НРК-удобрений на почвах и искусственных почвенных смесях с различными химическими свойствами и азотфиксирующей активностью. Изучена выживаемость в ризосфере и приживаемость в ризоплане растений бактерии в зависимости от почвенных условий при применении устойчивого к антибиотикам мутантного штамма. Установлены корреляции азотфиксирующей активности и урожая с химическими показателями почв и почвенных смесей.

Ключевые слова: *Pseudomonas*, столовая свекла, НРК-удобрения, почвы, почвенные смеси.

DOI: 10.31857/S0002188120110083

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проведены многочисленные исследования по применению стимулирующих рост растений ризосферных бактерий (plant growth-promoting rhizobacteria), в том числе фиксирующих атмосферный азот, с целью повышения урожая сельскохозяйственных культур [1]. Широкому применению и коммерциализации использования препаратов ризобактерий для стимуляции роста растений препятствует непостоянство получаемых результатов в полевых испытаниях [2]. В частности, установлено, что применение в полевых условиях бактериального удобрения азотобактерина, созданного на основе культуры азотфиксирующей бактерии *Azotobacter chroococcum*, не всегда отличалось стабильностью и давало неоднозначные результаты. При использовании этого препарата наряду со значительной стимуляцией роста растений и увеличением продуктивности сельскохозяйственных культур прибавки урожая были невысокими [3] и часто находились в пределах систематической ошибки полевых опытов. Во многом это было обусловлено тем,

что данный бактериальный препарат применяли без учета свойств почв. В этой связи эффективность ризосферных бактерий в различных почвенных условиях изучена недостаточно. Известно, что азотобактер весьма требователен к условиям среды, в том числе плохо переносит отклонения от нейтральной реакции, нуждается в достаточном количестве органического вещества и отличается низкой приживаемостью в ризосфере растений [3].

Рядом исследований установлена высокая эффективность применения стимулирующих рост растений флуоресцирующих бактерий рода *Pseudomonas* [1, 4]. Это обусловлено тем, что данные бактерии обладают высокой конкурентноспособностью с аборигенной почвенной микрофлорой, выживаемостью в ризосфере и приживаемостью в ризоплане [5–7], в том числе в сравнении с другими бактериями, например, *Bacillus subtilis* [6]. Среди представителей бактерий рода *Pseudomonas*, выделенных из ризосферы различных растений, выявлены бактерии, обладающие способностью фиксировать атмосферный азот [4, 8]. Азотфиксирующая активность этих бактерий, как правило, бывает низкой в чистых культурах и значительно повышается в ассоциациях с растениями [4].

¹ Работа выполнена в рамках госзадания “Физико-химические и биогеохимические процессы в антропогенно измененных почвах” АААА-А18-118013190180-9 от 31.01.2018 г.

Установлено, что ростстимулирующая активность и увеличение урожая растений (картофеля) при применении штаммов *P. fluorescens* и *P. putida* не всегда были непостоянными [9]. Также установлена неодинаковая отзывчивость (увеличение массы) сортов растений картофеля при применении ростстимулирующих бактерий *P. fluorescens* и *P. putida* на различных типах почв [10]. Колонизация ризосферы и ризоплана стимулирующими рост растений ризосферными бактериями являлась существенным фактором ростовой отзывчивости растений [9]. Влажность и тип почвы, вид и сорт растений, корневые экссудаты и выживание ростстимулирующих бактерий *P. fluorescens* и *P. putida* являлись определяющими и оказывающими существенное влияние на колонизацию интродуцированными бактериями ризосферы и ризоплана и на отзывчивость растений на бактериризацию [9]. Колонизация корневой системы растений ростстимулирующей бактерией *P. fluorescens* была экстенсивной и зависела от экологических факторов, главным образом, от водного режима почвы [11]. Приживаемость интродуцированных ассоциативных азотфиксирующих бактерий в почве и зоне корней растений определялась влажностью, окультуренностью почвы и корневыми экссудатами растений [12]. Неблагоприятные условия увлажнения и температура почвы могли быть причиной неудачной колонизации ризосферы и ризоплана бактериями и вариabельности увеличения урожая при внесении бактерий [9]. При установлении популяции флуоресцирующих псевдомонад на корнях растений доминирующая роль принадлежала свойствам почв, в сравнении с видом растений, что следует учитывать при изучении взаимодействия бактерий с растениями [13].

Действие стимулирующих рост растений ризосферных бактерий, в том числе флуоресцирующих бактерий рода *Pseudomonas* и фиксирующих атмосферный азот ризосферных бактерий, в зависимости от химических и биологических свойств почв изучено недостаточно. Для успешного применения микроорганизмов-стимуляторов роста растений, сопровождающегося увеличением урожая, необходимо исследовать эффективность их применения на почвах разного уровня плодородия. В настоящее время недостаточно информации о влиянии ростстимулирующих ризосферных бактерий, в том числе обладающих способностью фиксировать атмосферный азот, на урожай при выращивании сельскохозяйственных культур на почвах с различными свойствами.

Цель работы – изучение влияния внесения стимулирующей рост растений столовой свеклы азотфиксирующей ризосферной бактерии *P. putida* 23 на фоне внесения NPK-удобрений на урожай в различных почвенных условиях, отличающихся химическими свойствами и азотфиксирующей активностью.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили при выращивании растений столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.) сорта Бордо на различных почвах и искусственно созданных почвенных смесях в микрополевых и вегетационном опытах. В опытах использовали слой 0–20 см агродерново-подзолистой почвы, агросерой почвы и аллювиальной агротемно-гумусовой почвы центральной части поймы р. Оки (юг Московской обл.), смесь агросерой почвы и речного песка, смесь аллювиальной агротемно-гумусовой почвы и перепревшего навоза. Почвы просеивали через сито с диаметром ячеек 2 см. На полиэтиленовой пленке тщательно перемешивали агросерую почву с песком (в соотношении 1 : 1 по объему) и аллювиальную агротемно-гумусовую почву – с навозом. В опытах была использована культура флуоресцирующей бактерии *P. putida* 23, обладающая азотфиксирующей активностью – 8 нМ C_2H_4 /мг белка/мин при определении ацетиленовым методом [14]. Бактерия *P. putida* 23 в чистой и смешанных культурах стимулировала рост и увеличивала массу растений столовой свеклы [15], озимой пшеницы [16, 17], овса и ячменя [18] и сахарной свеклы [19]. Выбор столовой свеклы в качестве тестовой культуры был обусловлен тем, что применение этой бактерии наиболее значительно повышало урожай в отличие от других изученных сельскохозяйственных культур, и тем, что выращивание этой культуры требует постоянного достаточного увлажнения, в том числе необходимого для успешного роста бактерий.

В исходных образцах почв и почвенных смесей в начале опыта до посева семян определяли величину pH_{KCl} , содержание органического углерода (по Тюрину), валового азота (феноловым методом) после сжигания почвы и смесей в 33%-ной H_2SO_4 с катализатором (K_2SO_4 , Zn, Se, $CuSO_4 \cdot 4H_2O = 50, 12, 1, 0.1$), обменных Ca и Mg (в вытяжке 1 н. KCl), подвижных форм фосфора и калия (в вытяжке 0.2 н. HCl), Fe, Mn, Zn, Cu и Mo (в вытяжке 1 н. HCl). Содержание зольных элементов (кроме калия) в растворах определяли методом эмиссионно-оптической спектроскопии индуктивно-связанной плазмы на спектрометре ICP OES Optima 5900 DV (Perkin Elmer, США). Калий определяли

методом пламенной фотометрии на пламенном фотометре BWB XP 2011 (BWB, Великобритания), рН суспензий почв и почвенных смесей – в вытяжке 1 н. KCl (1 : 2.5) на рН-метре “рН 211” (HANNA instruments, Германия). Перед посевом семян определяли активность азотфиксации почв и смесей ацетиленовым методом при внесении глюкозы из расчета 2% от массы почвы и ее инкубации при 60% ПВ и 28°C в течение 24 ч [14]. Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием пакета MS Excel 2010.

Растения выращивали в опытах, проведенных в сетчатом вегетационном павильоне Института.

Микрополевые опыты. В сосудах без дна площадью 0.1 м² (0.33 × 0.33 × 0.33 м), изготовленных из винилпласта, вкопанных в верхний слой почвы и наполненных 36 кг почв и почвенных смесей, выращивали по 4 растения. При набивке сосудов почвами и смесями в верхний слой 0–15 см вносили азотное удобрение в виде азотнокислого аммония в дозе 1.2 г N/сосуд (12 г N/м²) на фоне внесения фосфорного и калийного удобрений соответственно в виде двухзамещенного фосфорнокислого калия и сернокислого калия в дозах по 1.2 г д.в./сосуд (12 г д.в./м²). Кроме того, в аллювиальную агротемно-гумусовую почву вносили перепревший навоз в дозе 200 г/сосуд (2 кг/м²). Пророщенные и предварительно стерилизованные 10%-ным раствором гипохлорита натрия семена были помещены на поверхность почвы в сосуде и инокулированы суспензией клеток бактерии в водопроводной воде из расчета 10⁸ КОЕ/растение и засыпаны слоем 3 см соответствующих почв и почвенных смесей. Адекватные количества суспензии автоклавированных бактериальных клеток применяли аналогичным образом в варианте без инокуляции. Растения выращивали под открытым небом в условиях естественного увлажнения, поддерживая влажность почвы в сосудах дополнительными поливами на уровне не меньше 60% ПВ. Повторность опытов пятикратная. После уборки растений сырые корнеплоды и надземную массу (ботву) взвешивали, затем высушивали и определяли сухую растительную массу.

Микрополевой опыт 1. Для выращивания растений были использованы следующие почвы и почвенные смеси:

1. Агродерново-подзолистая среднесуглинистая почва Чеховского р-на Московской обл., на которой в предыдущий год возделывали зерновые культуры. Участок пашни расположен в 15 км севернее левого берега р. Оки, в 400 м левее автодорожки Москва – Симферополь.

2. Агросерая среднесуглинистая почва, которая находилась в состоянии залежи на опытно-полевой станции Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, расположенной на правом берегу р. Оки (юг Московской обл.). Вследствие длительного распахивания, использования почвы и эрозионных процессов сильно изменены морфология и система верхних горизонтов почвенного профиля. В пахотный слой вовлечены гумусовый горизонт (A1), оподзоленный (A1A2) и частично 2-й гумусовый горизонт (Bh).

3. Агросерая среднесуглинистая почва с внесением песка.

4. Аллювиальная агротемно-гумусовая тяжелосуглинистая почва на современных аллювиальных отложениях центральной части поймы правого берега р. Оки (юг Московской обл.), на которой длительное время возделывали овощные культуры, в 2 км левее от автодорожки Москва – Симферополь.

5. Аллювиальная агротемно-гумусовая тяжелосуглинистая почва с внесением навоза.

Микрополевой опыт 2. Для выращивания растений были использованы следующие почвы и почвенные смеси:

1. Агродерново-подзолистая супесчаная почва, на которой в предыдущий год возделывали зерновые культуры. Участок пашни расположен в Серпуховском р-не Московской обл. в 10 км севернее левого берега р. Оки.

2. Агросерая среднесуглинистая почва, взятая с другого участка опытно-полевой станции Института, в отличие от микрополевого опыта в первый год исследования.

3. Агросерая среднесуглинистая почва с внесением песка.

4. Аллювиальная агротемно-гумусовая тяжелосуглинистая почва, взятая с другого участка поймы р. Оки, в отличие от микрополевого опыта в первый год исследования.

5. Аллювиальная агротемно-гумусовая тяжелосуглинистая почва с внесением навоза.

Вегетационный опыт. В сосудах, содержащих 1 кг каждой почвы и почвенной смеси, использованных в микрополевым опыте 2, выращивали в течение 8 нед по 2 растения столовой свеклы также на фоне внесения NPK-удобрений из расчета по 80 мг д.в./сосуд. Кроме того, в агросерую и аллювиальную агротемно-гумусовую почву были внесены соответственно песок и навоз из расчета, как и в микрополевых опытах. Влажность почвы и смесей в сосудах поддерживали поливами на

уровне не меньше 60% ПВ. Для определения колонизации бактерией *P. putida* 23 корней растений (ризоплана), выживания бактерии в почвах и почвенных смесях ризосферы растений был получен спонтанный мутантный штамм, устойчивый к антибиотикам рифампицину и канамицину (минимальные ингибирующие концентрации >200 мкг/мл). Бактерия была мечена транспозоном Tn5, контролирующим в псевдомонадах устойчивость к антибиотикам, с помощью суицидального плазмидного метода [20] с использованием суицидального вектора psup202 (Л.А. Анисимова, ИБФМ РАН). Семена при посеве инокулировали водной суспензией клеток этого мутантного штамма бактерии из расчета 10^8 КОЕ/растение. В качестве контроля был вариант с внесением адекватного количества автоклавированных бактерий. Повторность опыта пятнадцатикратная. В процессе роста растений в динамике через 4, 6 и 8 нед, используя 5 повторностей опыта, определяли численность интродуцированной бактерии в ризоплане и ризосфере растений по методу Гузевой–Звягинцева [21] с использованием среды Кинга Б для флуоресцирующих псевдомонад с добавлением рифампицина и канамицина в количествах по 200 мкг/мл среды. Почвы и почвенные смеси ризосферы и очищенные от них корни растирали в ступке со 100 мл стерильной воды, готовили серийные разбавления и проводили посев на агаризованную среду Кинга Б с содержанием антибиотиков. Подсчитывали количество выросших колоний и результаты выражали в КОЕ/г сухих почв, почвенных смесей и корней.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены исходные химические свойства почв и почвенных смесей, использованных в микрополевых и вегетационном опытах. Большинство почв и смесей микрополевого опыта 1 имели нейтральную реакцию среды, кроме не разбавленной песком агросерой почвы, имевшей слабокислую реакцию (pH_{KCl} 5.6). Среди серии почв и смесей этого опыта агродерново-подзолистая почва и агросерая почва, в том числе с внесением песка, характеризовались низким уровнем плодородия: имели значительно меньшее содержание органического углерода, валового азота и питательных элементов в сравнении с использованными обеими разновидностями аллювиальной агротемно-гумусовой почвы. Агродерново-подзолистая почва и агросерая почва, модифицированная песком, имели самое низкое содержание углерода и азота — почти в 2 раза меньше, чем агросерая почва, и почти в 3 раза меньше, чем ал-

лювиальная агротемно-гумусовая почва без внесения навоза. Однако в агродерново-подзолистой почве микрополевого опыта 1 отмечено максимальное содержание Мо, экстрагируемого 1 н. HCl — 0.6 мг/кг почвы, которое было в 3 раза больше, чем в других почвенных разновидностях обоих опытов. В агродерново-подзолистой почве в сравнении с агросерой почвой без внесения песка содержалось в 2 раза больше обменного Mg и подвижных форм фосфора, калия и Mn при одинаковом содержании остальных питательных элементов, за исключением повышенного содержания подвижного Мо. Разбавление агросерой почвы песком уменьшило в ней содержание углерода и азота почти в 2 раза, обменного Ca — в 2 раза, подвижного фосфора и Fe — в 1.3 раза и, напротив, увеличило pH_{KCl} до нейтрального, содержание обменного Mg — в 2 раза, подвижного Mn — в 1.3 раза, не влияя на другие показатели. Внесение в аллювиальную агротемно-гумусовую почву навоза увеличило в этой почве содержание органического углерода, валового азота, подвижного фосфора и обменного Mg в 1.2–1.3 раза, подвижного калия — в 1.7 раза и, напротив, уменьшило содержание обменного Ca в 1.2 раза, не оказывая влияния на содержание Fe и всех изученных микроэлементов.

Использованные в микрополевым опыте 2 и вегетационном опыте агродерново-подзолистая почва и агросерая почва, в том числе разбавленная песком, характеризовались самым низким уровнем плодородия. Эти почвенные разновидности имели минимальные содержания органического углерода и валового азота, подвижных форм фосфора и калия, обменных оснований и большинства микроэлементов, а также слабокислую и кислую реакцию среды (pH_{KCl} — в пределах 4.2–5.1) в сравнении с обеими разновидностями аллювиальной агротемно-гумусовой почвы. Агродерново-подзолистая почва этой серии почвенных разновидностей незначительно отличалась от агросерой почвы по многим химическим показателям, за исключением меньшего почти в 1.5 раза содержания обменного Ca и подвижного калия, и большего — подвижного фосфора, Fe и Mn (в пределах 1.5–2.5 раза). Разбавление агросерой почвы песком уменьшило соответственно в 1.6 и 2.6 раза содержание в ней углерода и азота, до 2-х раз — обменных оснований и подвижного калия и, напротив, увеличило содержание подвижных Zn и Mn соответственно в 1.4 и 2.0 раза, а также изменило реакцию среды в сторону нейтральной, не оказывая влияния на другие показатели. Аллювиальная агротемно-гумусовая почва микрополевого опыта 2 и вегетационного опыта,

Таблица 1. Химические свойства почв и почвенных смесей

Опыт	Почва, почвенная смесь	pH _{KCl}	C _{орг}	N _{вал}	Ca	Mg	P ₂ O ₅	K ₂ O	Fe	Zn	Mn	Cu	Mo
			%		1 н. KCl		0.2 н. HCl		1 н. HCl				
					мг-экв/кг почвы		мг/кг почвы						
Микрополевой 1	Агродерново-подзолистая почва	7.0	0.58	0.068	10	0.8	291	173	36	12	38	7	6
	Агросерая почва + песок	7.0	0.64	0.045	5	0.6	100	101	25	11	21	7	2
	Агросерая почва	5.6	1.09	0.119	10	0.4	131	102	33	11	16	7	2
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва	6.9	1.87	0.204	15	2.6	450	310	63	98	48	9	2
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва + навоз	7.0	2.45	0.236	13	3.4	550	540	63	98	48	9	2
Микрополевой 2, вегетационный	Агродерново-подзолистая почва	4.2	1.36	0.147	4	1.0	115	74	32	12	43	7	2
	Агросерая почва + песок	5.1	0.70	0.054	3	0.5	45	70	24	14	39	8	2
	Агросерая почва	4.5	1.11	0.139	7	1.0	44	118	21	10	20	9	2
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва	7.1	1.95	0.200	15	3.9	350	338	43	26	57	9	3
	Аллювиальная агро-темно-гумусовая почва + навоз	6.9	3.93	0.272	15	3.6	490	699	45	29	60	9	3

так же как и использованная в микрополевом опыте 1, имела максимальное содержание органического углерода, валового азота и всех питательных элементов, а также нейтральную реакцию среды в сравнении с другими почвенными разновидностями этого опыта. Внесение навоза в аллювиальную агротемно-гумусовую почву увеличило в ней содержание углерода, азота, подвижных форм калия и фосфора в пределах 1.4–2.1 раза, при этом концентрации остальных элементов, включая Fe и микроэлементы, а также реакция среды не изменялись.

Содержание микроэлементов Cu и Mo в подвижной форме во всех почвах и почвенных смесях в обоих микрополевых опытах, кроме повышенного (в 3 раза) содержания подвижного Mo в агродерново-подзолистой почве, отличалось несущественно. Во всех опытах в аллювиальной агротемно-гумусовой почве, в том числе удобренной навозом, в сравнении с другими почвенными разновидностями, содержание подвижных форм Fe, Mn и Zn было максимальным.

Применение меченной по устойчивости к антибиотикам рифампицину и канамицину бактерии *P. putida* 23 позволило изучить выживание в ризосфере и приживаемость бактерии в ризоплане растений столовой свеклы в динамике в процессе их роста в вегетационном опыте на почвах и

почвенных смесях, использованных в микрополевом опыте 2 (рис. 1). Эти показатели зависели от почвенных условий и продолжительности выращивания растений в течение опыта. В среднем за вегетационный период численность бактерии в ризосфере растений, выращиваемых на агродерново-подзолистой почве, была на самом высоком уровне, на минимальном – у выращиваемых на аллювиальной агротемно-гумусовой почве. Максимальное количество бактериальных клеток в ризосфере для большинства почвенных разновидностей было обнаружено в первый срок определения, после 28 сут роста растений. Численность бактерии в ризосфере растений в этот срок была максимальной на агродерново-подзолистой почве и составляла 21.1×10^5 КОЕ, на агросерой почве без внесения и с внесением песка варьировала в пределах $5.9–6.1 \times 10^5$ КОЕ, на аллювиальной агротемно-гумусовой почве с внесением навоза составляла 3.4×10^5 КОЕ/г почвы. Этот показатель был минимальным для растений на аллювиальной агротемно-гумусовой почве без внесения навоза – 0.5×10^5 КОЕ/г почвы. После 41 сут опыта, во второй срок определения установлено значительное снижение числа бактериальных клеток в ризосфере растений, произраставших на всех почвенных разновидностях, кро-

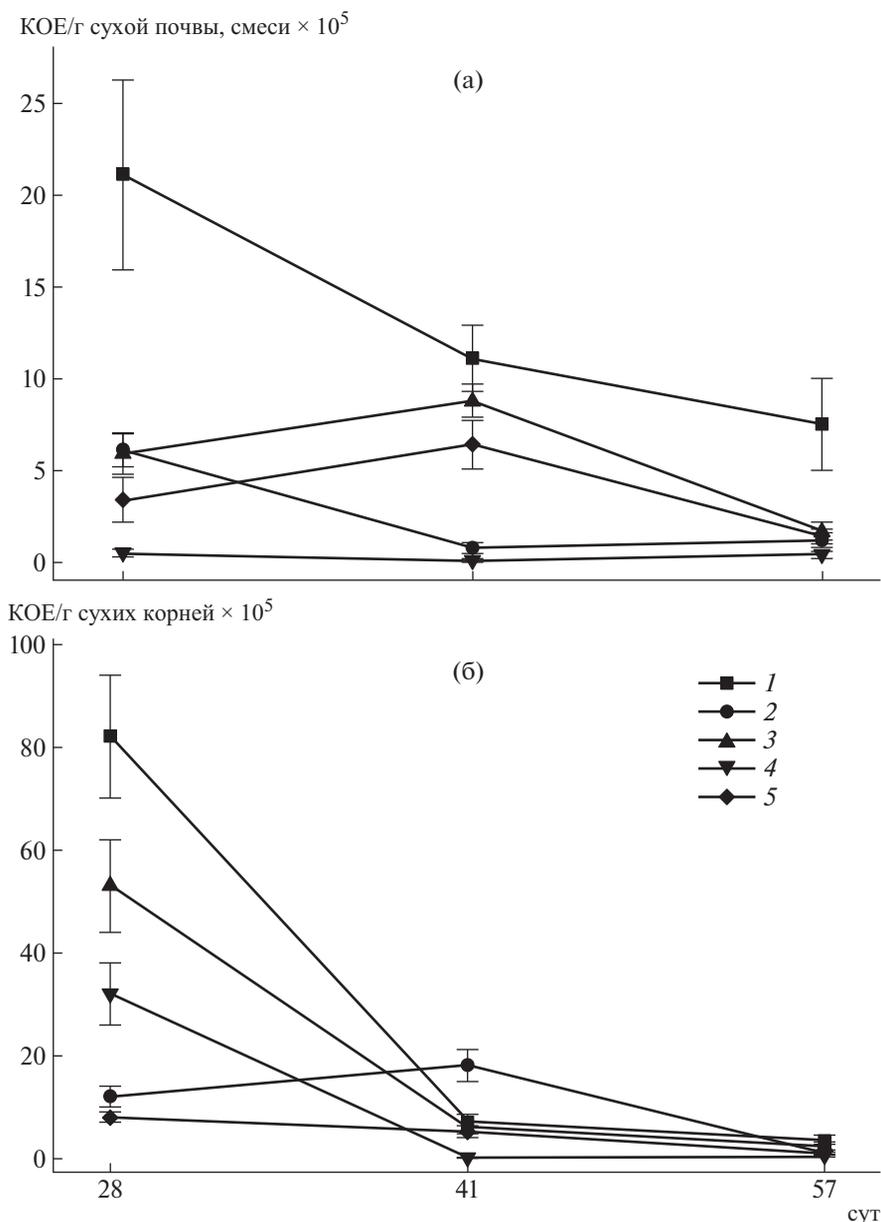


Рис. 1. Численность бактерии *P. putida* 23 в ризосфере (а) и ризоплане (б) столовой свеклы в вегетационном опыте. Почвы и почвенные смеси: 1 – агродерново-подзолистая почва, 2 – агросерая почва + песок, 3 – агросерая почва, 4 – аллювиальная агротемно-гумусовая почва, 5 – аллювиальная агротемно-гумусовая почва + навоз.

ме агросерой почвы и аллювиальной агротемно-гумусовой почвы, удобренной навозом. К концу опыта, после 57 сут выращивания растений по сравнению с предыдущим сроком определений численность бактерии в ризосфере растений на большинстве почвенных разновидностей продолжала уменьшаться. Для агросерой почвы, модифицированной песком, и аллювиальной агро-темно-гумусовой почвы, которые характеризовались самой низкой выживаемостью бактерии в ризосфере, этот показатель не изменился к концу опыта.

Приживаемость бактерии *P. putida* 23 в ризоплане, так же как и ее выживание в ризосфере, зависели от почвенных условий и продолжительности роста растений. В среднем за вегетационный период бактерия в наибольшей степени колонизировала корневую систему растений на агродерново-подзолистой и агросерой почвах, в наименьшей – на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, удобренной навозом. Максимальная численность бактерии в ризоплане, так же как и в ризосфере, отмечена в первый срок определений, через 28 сут роста растений на большинстве почв

и почвенных смесей. Наибольшее количество бактерии на корнях в этот срок было зафиксировано при выращивании растений на агродерново-подзолистой и агросерой почвах — 82×10^5 и 53×10^5 КОЕ/г сухих корней соответственно. Растения, произраставшие в это время на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, характеризовались несколько меньшей приживаемостью бактерии на корнях, которая составляла 32×10^5 КОЕ/г корней. В первый срок определения в ризоплане растений на аллювиальной агротемно-гумусовой и агросерой почвах с внесением соответственно навоза и песка этот показатель был минимальным — 8×10^5 и 12×10^5 КОЕ/г корней. Во 2-й срок определения, после 41 сут выращивания растений только на агросерой почве с внесением песка отмечено увеличение по сравнению с первым сроком численности бактерии в ризоплане, которая достигала 18×10^5 КОЕ/г корней. К этому времени количество бактериальных клеток на корнях растений, произраставших в остальных почвенных условиях, заметно снижалось и оставляло $5-7 \times 10^5$ КОЕ, за исключением аллювиальной агротемно-гумусовой почвы, для которой этот показатель уменьшился до минимума — 1×10^4 КОЕ/г корней. К концу опыта, после 57 сут роста растений численность бактерии в ризоплане продолжала уменьшаться, кроме аллювиальной агротемно-гумусовой почвы, и была в пределах $0,2-3,5 \times 10^5$ КОЕ для всех почвенных разновидностей. Высокая степень колонизации ризоплана и ризосферы, установленная с помощью генетически модифицированного и исходного штаммов бактерии *P. fluorescens*, и уменьшение численности в ризосферной почве и корнях интродуцированной бактерии по мере развития растений выявлена и другими исследователями [22]. При выращивании растений на агродерново-подзолистой и агросерой почвах приживаемость бактерии на корнях в конце опыта была максимальной. Увеличение численности бактерии во 2-й срок определения в ризоплане растений, произраставших на агросерой почве, модифицированной песком, сопровождалось одновременным уменьшением количества клеток в ризосфере. Кроме того, в этот срок определения для растений на агросерой почве и аллювиальной агротемно-гумусовой почве, удобренной навозом, установлено увеличение числа бактериальных клеток в ризосфере при одновременном снижении их приживаемости в ризоплане.

Исходные образцы почв и почвенных смесей резко отличались по активности азотфиксации (ацетиленредукции) (табл. 2). Среди почв и смесей, использованных в обоих микрополевых опы-

тах и в вегетационном опыте, агросерая почва, в том числе разбавленная песком, отличалась минимальной азотфиксирующей активностью, которая варьировала в пределах $11-35 \text{ мг } \text{C}_2\text{H}_4 \times 10^{-2}/\text{кг}$ почвы/ч. Разбавление этой почвы песком уменьшало данный показатель в виде тенденции. Используемые в микрополевом опыте 1 агродерново-подзолистая почва и аллювиальная агротемно-гумусовая почва с внесением навоза характеризовались максимальными показателями активности азотфиксации, которые составляли соответственно 292 и $374 \text{ мг } \text{C}_2\text{H}_4 \times 10^{-2}/\text{кг}$ почвы/ч и были более чем на порядок больше в сравнении с использованными в этом опыте агросерой почвой, в том числе разбавленной песком. Азотфиксирующая активность аллювиальной агротемно-гумусовой почвы микрополевого опыта 1 без внесения навоза была примерно одного порядка и только в 4–5 раз больше по сравнению с агросерой почвой, в том числе модифицированной песком. Внесение навоза усилило активность азотфиксации аллювиальной агротемно-гумусовой почвы этого опыта до 7 раз, таким образом, доводя этот показатель до уровня агродерново-подзолистой почвы. Активность азотфиксации аллювиальной агротемно-гумусовой почвы без внесения навоза, использованной в микрополевом опыте 2 и вегетационном опыте, отличалась в более, чем в 5 раз большими показателями в сравнении с почвой аналогичного типа микрополевого опыта 1. Внесение навоза в эту почву увеличило этот показатель в виде тенденции в опыте 2. Азотфиксирующая активность аллювиальной агротемно-гумусовой почвы, как без внесения, так и с внесением навоза, среди серии почв и почвенных смесей микрополевого опыта 2 была примерно на порядок больше в сравнении с агродерново-подзолистой почвой и агросерой почвой, в том числе модифицированной песком. При этом данный показатель был практически одинаков для агродерново-подзолистой почвы и агросерой почвы. Разбавление песком агросерой почвы уменьшило активность азотфиксации почти в 2 раза. Азотфиксирующая активность агродерново-подзолистой почвы, использованной в микрополевом опыте 2 и вегетационном опыте, была примерно в 7 раз меньше, чем у того же типа почвы микрополевого опыта 1.

В табл. 3 представлен урожай столовой свеклы после выращивания растений на различных почвах и почвенных смесях на фоне внесения НРК-удобрений в микрополевых опытах в течение 2-х разных вегетационных периодов. В результате проведения микрополевого опыта 1 максимальный урожай, в том числе корнеплодов, без внесе-

Таблица 2. Активность азотфиксации почв и почвенных смесей

Опыт	Почва, почвенная смесь	мг C ₂ H ₄ /кг почвы/ч × 10 ^{-2*}
Микрополевой 1	Агродерново-подзолистая почва	292 ± 33
	Агросерая почва + песок	11 ± 2
	Агросерая почва	14 ± 3
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва	51 ± 9
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва + навоз	374 ± 53
Микрополевой 2, вегетационный	Агродерново-подзолистая почва	43 ± 8
	Агросерая почва + песок	21 ± 4
	Агросерая почва	35 ± 4
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва	260 ± 52
	Аллювиальная агротемно-гумусовая почва + навоз	338 ± 61

*Средние из 5-ти определений ± ошибка средней.

ния бактерии *P. putida* 23, был зафиксирован на агродерново-подзолистой почве и аллювиальной агротемно-гумусовой почве, удобренной навозом. При внесении бактерии в этих условиях не обнаружено достоверных прибавок массы растений. Минимальный урожай без бактерий в этом опыте получен на агросерой почве, модифицированной песком. На агросерой и аллювиальной агротемно-гумусовой почве суммарная масса неинкулированных растений, в том числе корнеплодов, были соответственно незначительно и достоверно больше в сравнении с агросерой почвой, разбавленной песком. Внесение бактерии при выращивании растений на агросерой и аллювиальной агротемно-гумусовой почве примерно в равной степени увеличило сухую массу корнеплодов и ботвы соответственно на 28–32 и 40–48%, суммарную биомассу – на 30–36% в сравнении с растениями, выращенными на этих почвах без применения бактерии. Прибавки урожая при инокуляции бактерией на разбавленной песком агросерой почве были меньшими и составили для корнеплодов и ботвы соответственно 18 и 41%, для суммарной биомассы – 26%. Увеличение урожая инокулированных растений при этом в основном были связаны с ботвой. Аналогичные зависимости получены и для сырой массы растений.

Применение бактерии при выращивании растений на аллювиальной агротемно-гумусовой почве без внесения навоза в микрополевым опыте 1 обеспечило получение максимального урожая,

в том числе и корнеплодов, как и на агродерново-подзолистой, и на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, удобренной навозом. Напротив, несмотря на увеличение массы растений при применении бактерии на агросерой почве, в том числе модифицированной песком, урожай инокулированных растений, полученный на этих почвенных разновидностях, не достигал максимального уровня, который был зафиксирован на агродерново-подзолистой почве и аллювиальной агротемно-гумусовой почве, удобренной навозом.

В микрополевым опыте 2 без инокуляции бактерией максимальные урожаи столовой свеклы, включая корнеплоды, а также отсутствие прибавок массы растений при инокуляции бактерией *P. putida* 23 обнаружены на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, как без внесения, так и с внесением навоза. Минимальные урожаи неинкулированных растений установлены на агродерново-подзолистой почве и агросерой почве, в том числе модифицированной песком. Применение бактерии в наибольшей степени увеличило урожай при выращивании растений на агродерново-подзолистой почве, на которой была получена минимальная масса неинкулированных растений. При внесении бактерии на этой почве, сухая масса корнеплодов возросла на 44, ботвы – на 17, целых растений – на 34%. Применение бактерии на агросерой почве, в том числе модифицированной песком, привело к меньшим прибавкам урожая в сравнении с агродерново-подзолистой почвой. При разбавлении агросерой почвы песком и на аллювиальной агротемно-гумусовой почве увеличение урожая инокулированных растений в основном было связано с надземной частью. Аналогичные зависимости получены и для сырой биомассы растений. Несмотря на максимальные прибавки массы растений от инокуляции бактерией в микрополевым опыте 2 на агродерново-подзолистой почве, а также агросерой почве, в том числе модифицированной песком, урожай, полученный в этих почвенных условиях при применении бактерии, значительно уступал максимальному урожаю на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, в том числе удобренной навозом.

Корреляция величин азотфиксирующей активности с химическими показателями почв и почвенных смесей, использованных в микрополевым опытах 1 и 2 и в вегетационном опыте, представлена в табл. 4. Наибольшее положительное влияние на активность азотфиксации оказало содержание органического углерода ($r = 0.81$) и подвижного калия ($r = 0.76$). Активность азотфиксации также тесно коррелировала с содержанием в почвах и смесях валового азота, обменного

Таблица 3. Урожай столовой свеклы (микророльные опыты в различных почвенных условиях)

Опыт	Почва, почвенная смесь	Вариант	Масса растений, г/сосуд					
			сырое вещество			сухое вещество		
			корне- плоды	надземная часть	сумма	корне- плоды	надземная часть	сумма
1	Агродерново- подзолистая	Без инокуляции	1020	720	1740	170	59	229
		<i>P. putida</i> 23	1050	782	1830	162	74	236
	Агросерая + + песок	Без инокуляции	568	438	1010	91	46	137
		<i>P. putida</i> 23	662	576	1240	107	65	172
	Агросерая	Без инокуляции	606	370	976	109	43	152
		<i>P. putida</i> 23	900	754	1650	138	60	198
	Аллювиальная агротемно- гумусовая	Без инокуляции	654	400	1050	114	44	158
		<i>P. putida</i> 23	996	715	1680	150	65	215
	Аллювиальная агротемно-гуму- совая + навоз	Без инокуляции	951	522	1470	153	55	208
		<i>P. putida</i> 23	1010	716	1730	163	65	228
		<i>HCP</i> ₀₅	90	189	219	15	18	30
2	Агродерново- подзолистая	Без инокуляции	428	202	630	59	35	94
		<i>P. putida</i> 23	508	294	802	85	41	126
	Агросерая + + песок	Без инокуляции	488	178	666	83	29	112
		<i>P. putida</i> 23	650	384	1030	81	45	126
	Агросерая	Без инокуляции	536	228	764	87	37	124
		<i>P. putida</i> 23	646	442	1090	98	47	145
	Аллювиальная агротемно- гумусовая	Без инокуляции	926	332	1260	129	38	167
		<i>P. putida</i> 23	953	514	1470	118	58	176
	Аллювиальная агротемно-гуму- совая + навоз	Без инокуляции	958	346	1300	128	45	173
		<i>P. putida</i> 23	1030	595	1620	127	62	189
		<i>HCP</i> ₀₅	79	71	98	11	9	13

Mg, подвижных форм Mn и Fe ($r = 0.60-0.67$), подвижного фосфора ($r = 0.50$) и обменного Ca ($r = 0.55$). Между азотфиксирующей активностью и содержанием подвижных Cu, Mo и величиной рН_{KCl} почв и смесей обнаружена умеренная корреляция ($r = 0.32-0.39$). Активность азотфиксации не коррелировала с содержанием Zn ($r = -0.06$). Другими исследователями также показано, что азотфиксирующая активность (ацетиленредукция) почв в значительной степени определялась физико-химическими свойствами почв [23] и заметно усиливалась при внесении фосфорных удобрений [24].

Наибольшее положительное влияние на урожай неинокулированных растений оказали рН_{KCl} ($r = 0.77$), содержание подвижного фосфора и обменного Ca ($r = 0.66-0.69$) почв и почвенных смесей (табл. 5). Величина урожая без внесения бак-

терии также достаточно тесно коррелировала с содержанием подвижного калия ($r = 0.54$). Масса растений, выращенных без применения бактерии, в меньшей степени была связана с содержанием в почвах и смесях обменного Mg, а также подвижных Fe, Mn, Zn и Mo ($r = 0.33-0.39$). Между урожаем неинокулированных растений и содержанием органического углерода, а также валового азота обнаружена меньшая корреляция ($r = 0.27-0.28$), с содержанием Cu – незначительная отрицательная корреляция ($r = -0.17$). Теснота и характер корреляции урожая, следовательно зависимость этого показателя от химических свойств почв и почвенных смесей, кардинально не изменились при внесении бактерии *P. putida* 23.

Было показано, что определяющим фактором, влияющим на урожай столовой свеклы в условиях внесения NPK-удобрений, являются почвенные

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между азотфиксирующей активностью и химическими показателями почв и почвенных смесей (микрополевые опыты)

pH _{KCl}	C _{орг}	N _{вал}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca
0.37	0.81	0.60	0.50	0.76	0.55
Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
0.67	0.64	0.63	-0.06	0.32	0.41

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между урожаем столовой свеклы и химическими показателями почв и почвенных смесей (микрополевые опыты)

Вариант	pH _{KCl}	C _{орг}	N _{вал}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca
Без инокуляции	0.77	0.27	0.28	0.68	0.54	0.66
<i>P. putida</i> 23	0.74	0.22	0.28	0.69	0.50	0.68
	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
Без инокуляции	0.35	0.33	0.31	0.39	-0.17	0.33
<i>P. putida</i> 23	0.31	0.32	0.39	0.45	-0.15	0.32

условия. Минимальные урожаи (корнеплодов и надземной массы) без применения бактерии *P. putida* 23 в этих условиях в обоих микрополевых опытах были установлены при выращивании растений на почвах и искусственно созданных почвенных смесях, имевших минимальные показатели активности азотфиксации и большинства химических свойств плодородия. Максимальные урожаи неинокулированных растений были получены на почвах и почвенных смесях с высокой активностью азотфиксации независимо от уровня химических показателей их плодородия. Это подтверждено получением в микрополевом опыте 1 максимальных урожаев неинокулированных растений на удобренной навозом аллювиальной агротемно-гумусовой почве с высокой активностью азотфиксации и высокими показателями практически всех изученных химических характеристик плодородия, а также на агродерново-подзолистой почве с высокой азотфиксирующей активностью, но со значительно меньшими химическими показателями, кроме повышенного содержания подвижного Мо. Максимальные урожаи при этом для неинокулированных растений также были получены при максимальных показателях азотфиксирующей активности и при высоких химических параметрах плодородия – на аллювиальной агротемно-гумусовой почве в микрополевом опыте 1 и при внесении навоза в эту почву в обоих микрополевых опытах. Вероятно, высокий уровень азотфиксирующей активности агродерново-подзолистой почвы в опыте 1 был обусловлен форми-

рованием эффективного нитрогеназного комплекса в этой почве вследствие в 3 раза большего содержания в ней подвижного Мо. Кроме того, внесение навоза в аллювиальную агротемно-гумусовую почву с относительно низкой активностью азотфиксации в микрополевом опыте 1 усилило ее азотфиксирующую активность, увеличило большинство химических показателей и обеспечило получение максимального урожая.

Отзывчивость растений на внесение азотфиксирующей бактерии *P. putida* в 23 условиях внесения NPK-удобрений также зависела от почвенных условий. Применение бактерии повышало урожай при выращивании растений на агросерой почве, в том числе модифицированной песком, в обоих микрополевых опытах и на агродерново-подзолистой почве в микрополевом опыте 2, имевших низкие азотфиксирующую активность и показатели почвенного плодородия практически по всем изученным химическим свойствам.

Внесение бактерии также повышало урожай в микрополевом опыте 1 на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, имевшей меньшую активность азотфиксации и меньший уровень химических показателей плодородия по сравнению с этим типом почвы с внесением навоза. Прибавки урожая при применении бактерии в этих условиях были установлены только для растений, при выращивании на указанных выше почвах и почвенных смесях, которые характеризовались максимальной выживаемостью в ризосфере и приживаемостью в ризоплане. Внесение бактерии было неэффективным и не приводило к дальнейшему увеличению урожаев в почвенных условиях при высоком уровне азотфиксации независимо от химических показателей плодородия почв и почвенных смесей. В этих условиях бактерия отличалась низкой колонизацией ризосферы и ризоплана, что вероятно, было связано с ее слабой конкурентоспособностью с аборигенной микрофлорой. Внесение бактерии не приводило к дальнейшему увеличению урожаев в микрополевом опыте 1 на агродерново-подзолистой почве, имевшей высокую азотфиксирующую активность и невысокие (минимальные) химические показатели. Аналогичная зависимость в этом опыте установлена и на аллювиальной агротемно-гумусовой почве с внесением навоза с высокой активностью азотфиксации и максимальными показателями практически всех изученных химических свойств почв. При внесении бактерии также не обнаружено увеличение урожая в микрополевом опыте 2 на аллювиальной агротемно-гумусовой почве, в том числе с внесением навоза, имевшей высокую азотфиксирующую ак-

тивность и высокие показатели большинства химических свойств. Кроме того, внесение бактерии не обеспечило увеличение урожая до максимального уровня на почвах и почвенных смесях, характеризующихся низкой азотфиксирующей активностью и имевших самые низкие показатели большинства химических свойств, определяющих плодородие (агросерая почва, в том числе разбавленная песком в обоих микрополевых опытах, и агродерново-подзолистая почва микрополевого опыта 2). Таким образом, несмотря на значительное усиление активности азотфиксации при внесении бактерии *P. putida* 23, величины химических показателей плодородия вышеуказанных почв и почвенных смесей являлись лимитирующим фактором в повышении массы растений до максимального уровня. Применение бактерии в микрополевом опыте 1 на аллювиальной агротемно-гумусовой почве увеличило активность азотфиксации и урожай, в том числе корнеплодов, до максимального уровня, так же как и удобрение навозом плодородной по практически всем химическим показателям аллювиальной агротемно-гумусовой почвы с низкой азотфиксирующей активностью. Следовательно, в этом случае внесение бактерии по эффективности было равносильно удобрению этой почвы навозом.

ВЫВОДЫ

1. Урожай столовой свеклы и эффективность применения стимулирующей рост растений азотфиксирующей бактерии *P. putida* 23 на фоне внесения НРК-удобрений зависели от почвенных условий.

2. Максимальные урожаи удобренных НРК-растений без применения бактерии были получены на почвах и искусственно созданных почвенных смесях с максимальной азотфиксирующей активностью, как при низких, так и высоких показателях химических свойств, определяющих их плодородие.

3. Внесение бактерии увеличило урожай при выращивании растений в этих условиях на почвах и почвенных смесях с минимальной азотфиксирующей активностью и химическими показателями их плодородия при высокой выживаемости в ризосфере и приживаемости бактерии в ризоплане. Внесение бактерии не оказывало влияния на урожай на почвах и почвенных смесях с высокой азотфиксирующей активностью независимо от уровня их плодородия при низкой выживаемости в ризосфере и приживаемости бактерии в ризоплане.

4. Прибавки урожая, полученные при применении бактерии на почвах и почвенных смесях с минимальными азотфиксирующей активностью и показателями практически всех изученных химических свойств, определяющих плодородие, не обеспечивали увеличение урожая до максимального уровня.

5. Азотфиксирующая активность почв и почвенных смесей коррелировала с их химическими свойствами, наиболее значимо – с содержанием органического углерода, валового азота и подвижных форм фосфора, калия, Fe, Mn и обменных Ca и Mg. Реакция среды и содержание подвижных форм микроэлементов Mo и Cu показали умеренное положительное влияние на азотфиксирующую активность, содержание подвижного Zn – отсутствие корреляции.

6. Урожай растений без внесения бактерии в наибольшей степени коррелировал с реакцией почвенной среды, содержанием подвижного фосфора, калия и обменного Ca почв и почвенных смесей при умеренной корреляции с остальными химическими показателями, кроме слабой отрицательной корреляции с содержанием Cu.

7. Внесение бактерии *P. putida* 23 не оказывало кардинального влияния на тесноту и характер корреляции активности азотфиксации, а также урожая с химическими свойствами почв и почвенных смесей.

8. Определение азотфиксирующей активности почв может быть рекомендовано для прогноза эффективности применения испытанной бактерии при выращивании растений на различных почвах.

Автор благодарит ЦКП ИФХиБПП РАН за выполнение химических анализов почв и почвенных смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gupta G., Parihar S.S., Ahirwar N.K., Snehi S.K., Singh V. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Current and future prospects for development of sustainable agriculture // J. Microb. Biochem. Technol. 2015. V. 7. Iss. 2. P. 1–7. <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000188>
2. Lambert B., Joos H. Fundamental aspects of rhizobacterial plant growth promotion // Trend. Biotechnol. 1989. V. 7. № 8. P. 215–219.
3. Мишустин Е.Н., Шильникова В.К. Биологическая фиксация атмосферного азота. М.: Наука, 1968. С. 249–330.
4. Умаров М.М., Бурлуцкая Г.Р., Давидович О.Г., Матвеева Н.Г. Влияние инокуляции бактериями рода *Pseudomonas* на процессы азотного цикла в ризосфере небобовых растений // Микробиология. 1994. Т. 63. Вып. 2. С. 326–333.

5. *Гарагуля А.Д., Бабич Л.В., Киприанова Е.А., Смирнов В.В.* Способность различных видов бактерий рода *Pseudomonas* к колонизации корней пшеницы // Микробиол. журн. 1988. Т. 50. № 6. С. 77–81.
6. *Dijkstra A.F., Scholten G.H.N., van Veen J.A.* Colonization of wheat seedling (*Triticum aestivum*) roots by *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis* // Biol. Fertil. Soils. 1987. V. 4. № 1–2. P. 41–46.
7. *Vančura V.* Inoculation of plant with *Pseudomonas putida* // Interrelationships between microorganisms and plants in soil / Eds. Vančura V., Kunc F. Praha: Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences. 1989. P. 185–190.
8. *Barraquio W.L., Ladha J.K., Watanabe I.* Isolation and identification of N₂-fixing *Pseudomonas* associated with wetland rice // Canad. J. Microbiol. 1983. V. 29. № 8. P. 863–873.
9. *Klopper J.W., Schroth M.N., Miller T.D.* Effects of rhizosphere colonization by plant growth-promoting rhizobacteria on potato plant development and yield // Phytopathology. 1980. V. 70. P. 1078–1082.
10. *Howie W.J., Echandi E.* Rhizobacteria: influence of cultivar and soil type on plant growth and yield of potato // Soil Biol. Biochem. 1983. V. 15. № 2. P. 127–132.
11. *Davies K.G., Whitbread R.* Factors affecting the colonization of a root system by fluorescent *Pseudomonads*: The effects of water, temperature and soil microflora // Plant and Soil. 1989. V. 116. № 2. P. 247–256.
12. *Тимофеева С.В., Лагутина Т.М., Кожемяков А.П.* Моделирование воздействия агроэкологических факторов на приживаемость интродуцируемых бактерий в почве и зоне корней растений // Докл. РАСХН. 1999. № 6. С. 19–21.
13. *Latour X., Corberand T., Laguerre G., Allard F., Lemanseau P.* The composition of fluorescent pseudomonad populations associated with roots is influenced by plant and soil type // Appl. Environ. Microbiol. 1996. V. 62. № 7. P. 2449–2456.
14. *Умаров М.М.* Ассоциативная азотфиксация. М.: Изд-во МГУ, 1986. 136 с.
15. *Минеев В.Г., Шабаев В.П., Сафрина О.С., Смолин В.Ю.* Влияние бактерий рода *Pseudomonas* на урожай столовой свеклы и вынос азота растениями // Докл. ВАСХНИЛ. 1991. № 9. С. 26–31.
16. *Шабаев В.П., Смолин В.Ю.* Отзывчивость озимой пшеницы на инокуляцию бактериями рода *Pseudomonas* на серой лесной почве // Почвоведение. 2000. № 4. С. 497–504.
17. *Шабаев В.П., Воронина Л.П.* Урожай и качество зерна озимой пшеницы при внесении смешанной культуры бактерий рода *Pseudomonas* на фоне возрастающих доз азотного удобрения // Докл. РАСХН. 2007. № 5. С. 26–27.
18. *Шабаев В.П.* Оптимизация доз минеральных удобрений инокуляцией семян ростстимулирующими ризосферными бактериями при возделывании зерновых культур // Докл. РАСХН. 2004. № 6. С. 24–26.
19. *Шабаев В.П.* Влияние инокуляции сахарной свеклы ростстимулирующими бактериями рода *Pseudomonas* на урожай и качество растений // Агрохимия. 2008. № 4. С. 35–42.
20. *Simon R., Prieffer H., Pühler A.* A broad host range mobilization system for *in vitro* genetic engineering, transposon mutagenesis in gram negative bacteria // Biotechnology. 1983. № 11. Iss. 9. P. 784–791.
21. *Методы почвенной микробиологии и биохимии /* Под ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во МГУ, 1991. 303 с.
22. *Azajo M.A.V., Mendonça-Hagler L.C., Hagler A.N., van Elsas J.D.* Survival of genetically modified *Pseudomonas fluorescens* introduced into subtropical soil microcosms // FEMS Microbiol. Ecol. 1994. V. 13. № 3. P. 205–216.
23. *Tena M., Magallanes M.* Relation entre l'activite fixatrice d'azote non symbiotique et quelques proprietes physicochimiques du sol // Agronomie. 1985. V. 5. № 4. P. 369–373.
24. *Rao V.R., Rao J.L.N., Adhya T.K.* Heterotrophic nitrogen fixation (C₂H₂ reduction) as influenced by phosphorus application in paddy soils // Plant and Soil. 1986. V. 92. № 1. P. 125–132.

Efficiency of Using N₂-Fixing Bacterium under Growing Plants in Various Soil Conditions

V. P. Shabayev

*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, RAS
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia
E-mail: VPSH@rambler.ru*

The efficiency of using plant growth-promoting rhizobacteria, including N₂-fixing bacteria, in various soil conditions has not been sufficiently studied. In this connection, the effect of the red-beet growth-promoting N₂-fixing bacterium *Pseudomonas putida* 23 on the yield in micro-field experiments on soils and artificial soil mixtures with differing chemical properties and N₂-fixing activity against the background of NPK-fertilization was studied. In pot experiment, the survival of bacterium in the rhizosphere and its establishment in plant rhizoplane were studied depending on soil conditions under using an antibiotics-resistant mutant strain. The correlations of N₂-fixing activity and yield with chemical indices of soils and soil mixtures have been established.

Key words: *Pseudomonas*, red beet, NPK-fertilizers, soils, soil mixtures.