

DOI 10.33952/2542-0720-2021-4-28-159-182

УДК 579.64; 631.461; 633.1

Чайковская Л. А., Овсиенко О. Л.

**ФОСФАТМОБИЛИЗУЮЩИЕ МИКРООРГАНИЗМЫ:
1. БИОРАЗНООБРАЗИЕ, ВЛИЯНИЕ НА МИНЕРАЛЬНОЕ ПИТАНИЕ
РАСТЕНИЙ И ИХ ПРОДУКТИВНОСТЬ**

ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»

Реферат. Фосфор – один из основных питательных элементов, обеспечивающий благоприятное влияние не только на рост и развитие растений, а также ускорение образования репродуктивных органов, но и на формирование высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур с высоким качеством товарной продукции. Наибольшая питательная ценность для растений по праву принадлежит легкоусвояемым соединениям фосфора почвы и удобрений. Одним из перспективных направлений улучшения фосфорного питания сельскохозяйственных культур является биологическая фосфатмобилизация, осуществляемая почвенными микроорганизмами – бактериями и мицелиальными грибами (микромицетами) и способствующая переводу труднорастворимых соединений фосфора в доступные для высших растений формы. В данной обзорной статье рассмотрено воздействие микроорганизмов на растения с позиций улучшения их минерального питания, в частности фосфорного. Проведен анализ отечественных и зарубежных источников литературы (в основном за последние 15 лет), посвященных изучению биоразнообразия почвенных фосфатмобилизующих микроорганизмов и их влиянию на трансформацию труднорастворимых соединений фосфора. Детально раскрыты особенности механизмов биотрансформации органических и минеральных фосфатов почвенными микроорганизмами и основные критерии скрининга их эффективных изолятов, способных превращать труднорастворимые соединения фосфора в формы, доступные для растений. Показано, что биотрансформацию труднорастворимых соединений фосфора в водорастворимые формы осуществляют микроорганизмы, принадлежащие к различным таксономическим группам: бактериям и микромицетам. Рассмотрены работы, в которых исследованы вопросы практического применения эффективных штаммов микроорганизмов, трансформирующих труднодоступные соединения фосфора в усвояемые для растений формы и показана их роль в повышении доступности фосфора для сельскохозяйственных растений и увеличении их продуктивности. Приведена детальная характеристика микробных препаратов на основе фосфатмобилизующих микроорганизмов: «Агрофил», «Биовайс», «Экофосфорин», «Эковитал», «Биофосфорин», «Альбобактерин», «Полимиксобактерин», «Агробактерин», «Фосфостим», «Фитостимофос», «Агромик», «Бактопин», разработанных и применяемых в различных странах с целью оптимизации минерального питания культурных растений.

Ключевые слова: биологическая фосфатмобилизация, бактерии, микромицеты, солубилизация, минерализация, продуктивность растений, микробные препараты.

Для цитирования: Чайковская Л. А., Овсиенко О. Л. Фосфатмобилизующие микроорганизмы: 1. Биоразнообразие, влияние на минеральное питание растений и их продуктивность // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 4(28). С. 159–182. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-4-28-159-182.

For citation: Chaikovskaya L. A., Ovsienko O.L. Phosphate-mobilizing microorganisms: 1. Biodiversity, influence on plants mineral nutrition and productivity // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2021. No. 4(28). P. 159–182. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-4-28-159-182.

Введение

Фосфор (P), наряду с азотом (N) и калием (K), является одним из важных макроэлементов, необходимым для эффективного функционирования растений на всех этапах их роста и развития. Хотя в различных типах почв валовое содержание фосфора в виде органических и неорганических соединений достигает высокого уровня, большинство из них остаются неактивными и, следовательно, недоступными для растений. В кислых почвах преобладают труднорастворимые фосфаты алюминия (Al) и железа (Fe), в нейтральных и карбонатных – фосфаты кальция (Ca). Потому одной из наиболее острых проблем в земледелии является фосфорное питание растений, что связано с двумя основными причинами: ограниченным запасом фосфатных руд и быстрым связыванием этого элемента в почве при внесении с удобрениями. Известно, что растения ассимилируют не более 20–25 % P, вносимого с минеральными химическими удобрениями [1–3]. Остальная часть вымывается или переходит в почве в нерастворимую форму и становится недоступной для растений. Также, увеличение норм внесения минеральных удобрений не только нарушает баланс питания растений, но и приводит к снижению качества продукции и нарушению экосистемы почв, грунтовых вод и открытых водоемов.

Необходимо учесть то, что производство фосфорных минеральных удобрений – это энергоемкий и дорогостоящий процесс, чрезвычайно загрязняющий окружающую среду. Так как многие фермерские хозяйства в настоящее время не могут позволить себе использовать достаточное количество фосфорных удобрений для сокращения дефицита фосфора, необходимы альтернативные методы обеспечения P. Поэтому во многих странах проводят интенсивные исследования, направленные на поиск экологических приемов обеспечения растений фосфором, которые бы дополнили и частично заменили промышленные химические фосфорные удобрения. Одно из перспективных направлений улучшения фосфорного питания сельскохозяйственных культур – биологическая фосфатмобилизация, осуществляемая почвенными микроорганизмами (бактериями и микромицетами), которая способствует трансформации труднорастворимых соединений фосфора из почвы и удобрений в формы, доступные для высших растений [4–11]. Накопленный опыт свидетельствует о том, что применение бактериальных препаратов в технологиях выращивания сельскохозяйственных культур оказывает благоприятное воздействие на минеральное питание растений и увеличивает выход высококачественной продукции при рациональных расходах минеральных удобрений, а также улучшает экологическое состояние почв и повышает их плодородие [12–14]. Количество микробных препаратов для растениеводства в последние годы значительно увеличилось. Они созданы на основе свободноживущих, ассоциативных и симбиотических микроорганизмов, способных фиксировать атмосферный азот или превращать труднорастворимые фосфаты в формы, доступные для растений. Успешное применение эффективных микроорганизмов связано с правильным пониманием комплекса взаимодействий, происходящих между различными компонентами системы растение-микроорганизмы-почва. В настоящем обзоре рассмотрены различные аспекты микробной фосфатмобилизации: разнообразие фосфатмобилизирующих микроорганизмов, механизмы трансформации труднорастворимых соединений фосфора, влияние на минеральное питание и продуктивность растений.

Биоразнообразие фосфатмобилизирующих микроорганизмов и механизмы трансформации ими труднорастворимых соединений фосфора. Почвенные

микроорганизмы играют важную роль в круговороте фосфора благодаря его мобилизации из нерастворимых минеральных соединений (в частности фосфатов кальция, железа и алюминия) и трансформации органических фосфатов. Широкие микробиологические исследования, проведенные в последней четверти прошлого века и в начале нынешнего, выявили значительное распространение фосфатмобилизующих микроорганизмов в различных почвенно-климатических условиях [15–17]. Основными факторами превращения в почве труднорастворимых соединений фосфора в доступные для растений формы являются продукты микробного метаболизма. Известны две основные стратегии воздействия фосфатмобилизующих микроорганизмов на повышение доступности Р в почве: 1) усиленное растворение минеральных фосфатов благодаря подкислению почвенного раствора и высвобождению металла комплексообразователя (преимущественно анионов органических кислот) и 2) ферментативное расщепление органических фосфатов [15, 18]. С точки зрения круговорота фосфора в естественных условиях, вероятно, что вторая стратегия наиболее важна в природном потоке Р через систему растение–почва. Однако в условиях с высокой степенью ограничения Р (почвы сельскохозяйственных угодий), вероятно, первая стратегия становится более важной для мобилизации труднорастворимых фосфатов. Рассмотрим более детально роль фосфатмобилизующих микроорганизмов в каждой из стратегий.

Снижение рН почвенного раствора. Способность некоторых почвенных микроорганизмов растворять фосфаты кальция с помощью органических и минеральных кислот, образуемых бактериями и микромицетами, была выявлена еще в начале прошлого века. Установлено, что подкисление является одним из главных механизмов биологической мобилизации фосфора минеральных фосфатов. Основным механизмом растворения фосфатов является снижение рН почвенного раствора благодаря микробиологическому продуцированию органических кислот или высвобождению протонов [6, 11, 15, 20–22]. Наиболее распространенными органическими кислотами, растворяющими фосфаты, являются лимонная, молочная, глюконовая, щавелевая, уксусная, 2-кетоглюконовая, яблочная, фумаровая, янтарная, винная, малоновая, глутаровая, пропионовая, масляная, глиоксалева и адипиновая [6, 21, 22]. Из перечисленных органических кислот, глюконовая и 2-кетоглюконовая – наиболее частые агенты растворения минеральных соединений фосфора [6, 19]. Так, глюконовая кислота доминирует среди органических кислот, продуцируемых такими фосфатмобилизующими бактериями, как *Pseudomonas sp.*, *Erwinia herbicola* и *Burkholderia cepacia* [19]. Главными продуцентами 2-кетоглюконовой кислоты, идентифицированной у штаммов, обладающих способностью к солубилизации фосфатов, являются *Rhizobium leguminosarum*, *R. meliloti* и *Bacillus firmus* [19]. Имеются сведения о том, что грамотрицательные бактерии по сравнению с грамположительными более эффективно растворяют минеральные соединения фосфора: благодаря интенсивному выделению различных органических кислот в окружающую среду [22]. Кроме того, фосфатмобилизующие микроорганизмы создают кислотность путем выделения CO_2 , как это происходит при солубилизации фосфатов кальция [6].

Хелатирование. Важная роль в растворении фосфорсодержащих минералов почвы принадлежит хелатообразованию [6, 11]. Известно, что органические и неорганические кислоты, продуцируемые фосфатрастворяющими микроорганизмами, не только подкисляют среду, но и образуют хелаты с металлами [7, 23, 24]. Хелаты – это комплексные соединения металлов со сложной органической молекулой, одним из важных свойств которых является легкая растворимость. Гидроксильные и карбоксильные группы кислот хелатируют катионы, связанные с фосфатом, тем самым превращая его в растворимые формы. Мощным хелатором является 2-кетоглюконовая кислота, которую продуцируют многие аэробные

фосфатрастворяющие микроорганизмы: они универсальны в солюбилизации различных форм гидроксиапатитов, фторапатитов и фосфатов Al [6]. Имеются сведения о том, что гуминовым и фульвокислотам, которые выделяются при микробиологическом разложении растительных остатков, также присущи свойства хороших хелаторов Ca, Fe и Al, присутствующих в нерастворимых фосфатах [25].

Минерализация. Большая группа труднодоступных для растений почвенных фосфатов – это органические соединения, наиболее распространенными из них являются соли фитиновой кислоты. Органические фосфаты преобразуются микроорганизмами в процессе минерализации в доступную для растений форму. Они попадают в почву вместе с растительными и животными остатками, содержащими большое количество органических соединений фосфора, таких как: фосфолипиды, фосфогликозиды, фитиновая кислота, нуклеиновые кислоты, полифосфаты и фосфонаты [7, 15]. Важная роль в круговороте фосфора в почвах сельскохозяйственных угодий принадлежит минерализации и иммобилизации органических фосфатов. Фосфатмобилизующие микроорганизмы минерализуют органические соединения фосфора путем продуцирования фосфатаз, в частности фитазы [7, 15, 21, 22, 26]. Фитаза гидролизует органические формы фосфатов и высвобождает неорганический фосфор, который иммобилизуется как растениями, так и микроорганизмами. Микроорганизмы (бактерии и микромицеты), разлагающие фитаты Ca, Al и Fe, впервые выделены из почв и описаны Г. С. Муромцевым, В. Ф. Павловой и Т. С. Самойловой [15]. К микромицетам, наиболее часто продуцирующим фитазу, относятся: *Aspergillus candidus*, *A. fumigatus*, *A. niger*, *A. parasiticus*, *A. rugulosus*, *A. terreus*, *Penicillium rubrum*, *P. simplicissimum*, *Pseudeurotium zonatum*, *Trichoderma harzianum* и *T. viride* [15, 26]. Щелочные и кислые фосфатазы также используют органические фосфаты в качестве субстрата для преобразования их в неорганическую форму. Почвенные бактерии, в том числе и *Streptomyces sp.*, минерализуют сложные органические фосфаты благодаря продуцированию внеклеточных ферментов, таких как фосфоэстеразы, фосфодиэстеразы, фитазы и фосфолипазы [6]. Имеются сведения о том, что смешанные культуры фосфатмобилизующих бактерий (бацилл, стрептококков и псевдомонад) наиболее эффективны в минерализации органических соединений фосфора [7]. Некоторые фосфатмобилизующие микроорганизмы продуцируют сидерофоры, обладающие способностью к гидролизу органических фосфатов в почве и превращению их в доступные формы [7, 9, 21, 22].

Исходя из вышеизложенного, превращение труднорастворимых соединений фосфора в водорастворимые доступные для растений формы могут осуществлять микроорганизмы, принадлежащие к различным таксономическим группам – бактериям и микромицетам.

Б а к т е р и и. Исследования, проведенные в различных странах, свидетельствуют о том, что солюбилизацию труднорастворимых фосфатов могут осуществлять бактерии достаточно широкого круга. Так, китайские исследователи выделили из ризосферы грецкого ореха 34 штамма почвенных фосфатрастворяющих бактерий и идентифицировали их под родами *Pseudomonas*, *Stenotrophomonas*, *Bacillus*, *Cupriavidus*, *Agrobacterium*, *Acinetobacter*, *Arthrobacter*, *Pantoea* и *Rhodococcus* путем сравнения последовательностей 16S рибосомальной РНК [27]. Установлено, что фосфатрастворяющая активность выделенных штаммов связана со снижением pH среды. Для дальнейших экспериментов использовали три штамма с высокими фосфатрастворяющими способностями: *Pseudomonas chlororaphis* (W24), *P. fluorescens* (W12), *Bacillus cereus* (W9). В условиях тепличных экспериментов показано, что применение W24 или W12 значительно улучшило биометрические показатели семян грецкого ореха (высоту, сухую массу побегов и корней), а также

поглощение Р и N растениями. Однако наиболее выраженное благотворное влияние отмечено при совместной инокуляции тремя штаммами фосфатрастворяющих бактерий.

Ученые Аргентины определили потенциал бактериальных штаммов, ассоциированных с растениями арахиса. Выделено 433 изолята из ризосферы, филлосферы и растительных тканей арахиса, выращенного в производственном районе Кордовы. Выявлено, что солюбилизирующей активностью к трикальцийфосфату обладают 37 эпифитных и 73 эндофитных изолята из этой коллекции [28]. Наиболее эффективный изолят J49, увеличивающий биомассу растений арахиса в экспериментах с инокуляцией, идентифицирован как бактерия, принадлежащая к роду *Pantoea*.

Из почв сельскохозяйственных угодий выделена бактерия, солюбилизирующая минеральные фосфаты, идентифицированная как *Burkholderia cepacia* DA23 [29]. В лабораторных экспериментах количественно определена фосфатрастворяющая активность штамма в отношении трех типов минерального нерастворимого фосфата. Установлено, что при использовании в качестве источника углерода глюкозы 3 %-й концентрации, *B. cepacia* DA23 обладает выраженной фосфатсолюбилизирующей активностью, напрямую связанной со снижением pH питательной среды.

Изучено влияние двух штаммов (*Pseudomonas fluorescens* и *Bacillus megaterium*) почвенных бактерий, растворяющих минеральные фосфаты, на посевные качества семян и рост проростков нута в лабораторных опытах [30]. Показано, что при комбинированной инокуляции (обоими штаммами бактерий) семян нута увеличение длины корешка и проростка было больше по сравнению с моноштаммовой обработкой.

В литературных источниках имеются сведения о выделении фосфатрастворяющих бактерий из ризосферы и ризопланы риса *Oryza sativa* L. Так, индийские исследователи выделили из различных типов почв ризосферы риса 30 эффективных изолятов, идентифицированных как *Enterobacter*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Klebsiella* и *Serratia* [31]. Выделенные штаммы бактерий высвобождали из трикальцийфосфата большое количество Р (от 22,4 до 825,8 мкг/мл), а количество фосфатазы, выделяемой в среду, варьировало в пределах 11,6–64 U. Однако авторы заключают, что эффективность штаммов для солюбилизации фосфата в большей мере зависит от специфичности фермента фосфатазы, чем от её количества, выделяемого в среду. Среди всех изученных штаммов наибольшее количество фосфора выделял штамм А4 (*Enterobacter aerogenes*). Исследователи из Бангладеш [32] выделили из ризопланы риса шесть эффективных изолятов фосфатрастворяющих бактерий, идентифицированных по фенотипическим признакам и данным секвенирования генов 16S рРНК как *Acinetobacter sp.* BR-12, *Klebsiella sp.* BR-15, *Acinetobacter sp.* BR-25, *Enterobacter sp.* BR-26, *Microbacterium sp.* BRS-1 и *Pseudomonas sp.* BRS-2. Наиболее высокую фосфатрастворяющую активность проявили штаммы BR-25 и BR-15. Анализ с помощью сканирующего электронного микроскопа двухнедельных проростков риса из семян, предварительно инокулированных BR-25 и BR-15, выявил плотную колонизацию бактериальных клеток на поверхности корней (предположительно с использованием фимбрий).

Исследование влияния эффективного фосфатрастворяющего штамма *Acinetobacter rhizosphaerae* ВИНВ 723, выделенного из почв холодных пустынь Транс-Гималаев, на труднорастворимые минеральные фосфаты показало значительно более высокую растворимость трикальцийфосфата, чем природных фосфоритов различных месторождений: Удайпур, Муссури и Северная Каролина [33]. При солюбилизации штаммом *A. rhizosphaerae* ВИНВ 723 различных труднорастворимых соединений

фосфора выявлены качественные и количественные различия в продуцировании органических кислот (глюконовой, щавелевой, 2-кетоглюконовой, молочной, яблочной и муравьиной). Выявлено, что в составе органических кислот, продуцируемых штаммом ВИНВ 723 при растворении фосфатов, доминировала глюконовая кислота. Установлено также, что продуцирование муравьиной кислоты лимитировалось солубилизацией трикальцийфосфата, а щавелевой – природных фосфоритов. В условиях вегетационных опытов отмечено положительное влияние инокуляции *A. rhizosphaerae* ВИНВ 723 на увеличение высоты растений, сухой массы их побегов, длины и сухой массы корней, а также содержания фосфора (P) в корнях, побегах и почве по сравнению с небактеризованными растениями, выращенными на фонах с внесением минеральных удобрений.

Поиск эффективных штаммов бактерий, способных к солубилизации минеральных труднорастворимых фосфатов, проведен исследователями Китая. Так, спорообразующий штамм 9320-SD, выделенный из каштановой пахотной почвы, эффективно высвобождал растворимый фосфор из порошкообразного фосфорита после инкубации в жидкой питательной среде при температуре 30 °С [34]. Максимальное количество доступного фосфора достигало 12,01 ммоль/л после семидневной инкубации. Отмечена прямая положительная корреляция ($r = 0,9330$) между уровнем высвобождения растворимого фосфора и концентрацией жизнеспособных бактерий. Проведено выделение и скрининг 36 штаммов фосфатсолубилизирующих бактерий из субтропических почв Центрального Тайваня [35]. Фосфатрастворяющая активность изолятов проверена на среде с трикальцийфосфатом после инкубации при 30 °С. Идентификация и филогенетический анализ штаммов, проведенные на основе секвенирования 16S рРНК показали, что 10 изолятов принадлежали к роду *Bacillus*, девять – к роду *Rhodococcus*, семь – к роду *Arthrobacter*, шесть – к роду *Serratia* и по одному – к родам *Chryseobacterium*, *Delftia*, *Gordonia* и *Phyllobacterium*. Кроме того, для четырех штаммов (*Arthrobacter ureafaciens*, *Phyllobacterium myrsinacearum*, *Rhodococcus erythropolis* и *Delftia sp.*) впервые выявлена способность растворять значительное количество трикальцийфосфата в жидкой среде путем выделения органических кислот и снижением pH среды. В культуральной жидкости этих изолятов обнаружено восемь различных видов органических кислот, а именно: лимонная, глюконовая, молочная, янтарная, пропионовая и три неидентифицированные кислоты.

Крымские ученые провели первичную оценку штаммов фосфатмобилизирующих бактерий, выделенных из чернозема южного карбонатного ризосферы озимой пшеницы [36]. Установлено, что большинство (82 %) исследуемых штаммов характеризуется высоким коэффициентом удельной фосфатрастворяющей активности (Kr), наибольшее его значение отмечено для штамма 0613. Выявлено, что 44 % штаммов обладают высокой способностью к трансформации $Ca_3(PO_4)_2$ в растворимую форму, максимальное содержание P_2O_5 (212 мг/л) отмечено в культуральной жидкости штамма 1702. В условиях лабораторных опытов изучено влияние отобранных штаммов фосфатмобилизирующих бактерий на посевные качества семян озимой пшеницы. Показано, что инокуляция семян повышает их всхожесть и энергию прорастания, а также обеспечивает достоверную прибавку массы проростков озимой пшеницы по сравнению с контролем: нововыделенные штаммы 0735, 1204, 1701 – на 32, 38 и 29 % соответственно.

Из ризосферы различных сельскохозяйственных культур Кореи выделены и идентифицированы бактерии, активно растворяющие труднорастворимые минеральные фосфаты в жидкой культуре [37]. В результате скрининга отобраны 13 наиболее перспективных изолятов, а также проведена их идентификация на основе анализа последовательности 16S рРНК, что позволило отнести их к родам

Enterobacter, *Pantoea* и *Klebsiella*. Последовательности трех репрезентативных штаммов депонированы в библиотеке данных нуклеотидных последовательностей GenBank под регистрационными номерами AY335552, AY335553, AY335554.

Существуют данные о наличии фосфатмобилизующей способности у симбиотических азотфиксирующих бактерий [38]. Так, у одного из штаммов (ARPV02), выделенных из растений *Phaseolus vulgaris* произрастающих в почве Эль-Чако-Аридо (Аргентина), обнаружена высокая способность к клубенькообразованию, фиксации азота и растворению минеральных фосфатов. Секвенирование 16S рРНК, выполненное для штамма ARPV02, показало его 100 % сходство со штаммом первого типа *Rhizobium trifolii* ATCC14480, который рассматривается в настоящее время как биовар вида *Rhizobium leguminosarum* вместе с биоварами *viceae* и *phaseoli*.

Проведены исследования изолятов ризобий, выделенных из почв Ирана, на способность к растворению неорганических и органических фосфатов [39]. Выявлено, что из 446 изолятов растворяли трикальцийфосфат и инозитол гексафосфат 198 (44 %) и 341 (76 %) соответственно. Кроме того, установлено, что изоляты, принадлежащие к группе *Rhizobium leguminosarum* *bv. viciae*, мобилизуют трикальцийфосфат в жидкой среде. Отмечена значительная корреляция между высвобождением растворимого Р и снижением рН фильтратов культуральной жидкости, что указывает на важность продуцирования кислоты в процессе мобилизации. Однако, ни у одного из 70 протестированных изолятов *Bradyrhizobium* не выявлено способности к солюбилизации трикальцийфосфата в жидкой среде.

Из ризосферы сои выделена бактерия, растворяющая фосфаты, устойчивая к соли и рН и идентифицированная как *Pantoea agglomerans* [40]. При культивировании в жидкой среде (30 °С) наибольшая солюбилизация нерастворимых фосфатов отмечена для гидроксиапатита (1357 мг/л) и трикальцийфосфата (1312 мг/л). Кроме того, штамм *P. agglomerans* продуцировал растворимый фосфат в культуральную жидкость из $FePO_4$ и $AlPO_4$: 28 мг/л и 19 мг/л соответственно.

Известно, что стрептомицеты являются мощными продуцентами многих ферментов, однако сведения в литературных источниках об их участии в процессе солюбилизации труднорастворимых фосфатов незначительны. Так, некоторые авторы отмечают положительное влияние *Streptomyces albus*, *S. cyaneus* и *Streptoverticillium album* на подвижность фосфора и его доступность для растений [11, 22]. Проведен скрининг восьми изолятов стрептомицетов, солюбилизующих труднорастворимые фосфаты из месторождений Марокко [41]. Выявлено, что шесть из этих штаммов эффективно высвобождали растворимый фосфор из труднорастворимых фосфатов и были способны к росту на корневых экссудатах пшеницы в качестве единственных источников питательных веществ. Также данные изоляты подавляли рост потенциально фитопатогенных грибов, бактерий (грамм +/-) и дрожжей. Для пяти из этих штаммов характерно продуцирование индолилуксусной кислоты, а четыре проявляли эндофитные свойства. Проведены эксперименты в условиях лабораторных опытов: изоляты стрептомицетов культивировали в присутствии проростков пшеницы в синтетической минимальной среде (в пробирках), содержащей нерастворимый фосфат в качестве единственного источника фосфора. Выявлено, что наиболее активные штаммы, солюбилизующие труднорастворимые фосфаты, оказывали стимулирующее действие на продуктивность растительной биомассы. Подобные результаты получены и при выращивании пшеницы в условиях вегетационного эксперимента (субстрат – почва). Необходимо отметить, что наиболее эффективный штамм *Streptomyces griseus* (ВН7) стимулировал рост растений по сравнению с контролем (без инокуляции) как в модельных опытах в пробирках, так и в условиях вегетационных опытов более чем на 70 % и 30 % соответственно. Проведенные эксперименты демонстрируют возможность применения стрептомицетов для

разработки новых, экологически безопасных методов ведения сельского хозяйства путем внесения новых биоудобрений и продуктов биоконтроля, состоящих из спор и/или мицелия специальных актинобактерий в сочетании с измельченными труднорастворимыми фосфатами.

Микромицеты. Почвенные микромицеты принимают активное участие в трансформации труднорастворимых фосфатов. Растворение неорганического Р микробными сообществами, включая грибы, является обычным явлением в условиях *in vitro*; однако *in situ* эффективность микробов, солюбилизирующих фосфаты, противоречива. Необходимо отметить, что почвенные микромицеты, помимо солюбилизации минералов, проявляют такие свойства, как биологический контроль и выработка вторичных метаболитов. Таким образом, их потенциал для усиления роста растений очевиден [15, 23, 42]. В литературных источниках имеются сведения о том, что микромицеты, выделенные из почвы засушливых и полузасушливых районов Индии, продуцируют фитазу и фосфатазу [26]. Установлена способность выделенных изолятов к гидролизу двух важных органических соединения фосфора: фитина и глицерофосфата. Идентификация изученных микромицетов установила их принадлежность к четырем родам: *Aspergillus*, *Penicillium*, *Pseudeurotium* и *Trichoderma*.

Китайские исследователи выделили из ризосферы пшеницы три стрессоустойчивых и фосфатрастворяющих штамма почвенных грибов, идентифицированных как *Aspergillus niger*, *A. japonicus*, *Penicillium simplicissimum* [43]. Наибольшая эффективность в растворении фосфата горных пород характерна для *P. simplicissimum*, за которым следовали *A. niger* и *A. japonicus*. Все штаммы демонстрировали высокий уровень стрессоустойчивости к таким факторам, как температура – 10~45 °С, рН – 4~11 ед., засоление – 0~3,5 % NaCl. Кроме того, отмечено различие штаммов по своей способности выживать и выделять растворимый фосфор из фосфата горных пород в условиях стресса.

Данные литературных источников свидетельствуют о положительном влиянии фосфатрастворяющих штаммов микромицетов не только на солюбилизацию труднорастворимых фосфатов, но и на продуктивность различных сельскохозяйственных культур. Так, изучено влияние шести изолятов фосфатрастворяющих грибов: двух штаммов *Aspergillus awamori* и четырех штаммов *Penicillium citrinum*, выделенных из ризосферы различных сельскохозяйственных культур, на рост и обсемененность нута (*Cicer arietinum* L. cv. GPF2) в условиях вегетационных экспериментов [44]. Выявлено, что фосфатная солюбилизирующая активность микромицетов в жидкости варьировала в пределах 38–760 мкг/мл⁻¹ для трикальцийфосфата и 28–248 мкг/мл⁻¹ для фосфата породы Муссури. Кроме того, все изоляты исследуемых микромицетов продуцировали индолилуксусную кислоту (ИУК) в концентрации 2,5–9,8 мкг/мл⁻¹. В условиях вегетационных опытов показано, что при инокуляции штаммом *A. awamori* выявлен максимальный стимулирующий эффект на растения нута: его применение способствовало увеличению высоты побега на 7–12 %, почти трехкратному увеличению количества семян и двукратному увеличению массы семян по сравнению с контролем. Подобные результаты получены также при изучении трех эффективных фосфатсолюбилизирующих штаммов почвенных микромицетов, протестированных на *Pennisetum glaucum* в условиях вегетационных опытов с добавлением каменных фосфоритов горных пород [45]. Отмечено положительное влияние совместного применения фосфоритов горных пород и микромицетов, растворяющих фосфаты, на рост растений: большинство биометрических параметров возросли после инокуляции.

Китайские ученые выделили из фосфатсодержащих горных пород изоляты фосфатрастворяющих микромицетов, идентифицированных как *Penicillium expansum*,

Mucor ramosissimus и *Candida krisii* [46]. Экспериментально доказано, что в культуральной среде, инокулированной этими изолятами, присутствуют не только органические кислоты (лимонная, щавелевая и глюконовая), но и ферменты: кислая и щелочная фосфатазы, способствующие солюбилизации фосфатов горных пород. При этом выявлена сильная отрицательная корреляция ($r = -0,89$) между содержанием растворимого фосфора и значением pH культуральной среды. Эффективный изолят фосфатсолюбилизирующих грибов, идентифицированный как *Penicillium oxalicum*, выделен в Индии из ризосферной почвы отвалов фосфатных рудников [47]. Проведены лабораторные эксперименты по тестированию его эффективности для солюбилизации фосфорита горных пород, а также полевые опыты для выявления стимулирующего эффекта на рост пшеницы и кукурузы, выращенных в почве, обогащенной горной породой. Выявлено, что *P. oxalicum* эффективно растворяет горный фосфорит в жидкой среде, выделяя при этом большое количество доступного для растений фосфора. В условиях полевых экспериментов показано, что инокуляция *P. oxalicum* значительно увеличила рост и продуктивность двух сельскохозяйственных культур: пшеницы и кукурузы по сравнению с контролем. При этом отмечено, что содержание P в растениях и уровни доступных P и органического C значительно увеличились в почве с внесенной горной породой, инокулированной *P. oxalicum*. На основании проведенных экспериментов авторы сделали заключение о том, что *P. oxalicum* вместе с горным фосфоритом может заменить минеральное удобрение в щелочной почве и оказать помощь в повышении производства сельскохозяйственных культур.

Таким образом, фосфатмобилизующие микроорганизмы представлены большим разнообразием видов и распространены в ризосфере сельскохозяйственных культур различных почвенно-климатических условий.

Влияние биофосфора на минеральное питание растений. Способность почвенных микроорганизмов превращать труднорастворимые соединения фосфора в доступную форму является важной особенностью RGPB (бактерий, способствующих росту растений и повышению их продуктивности). Известно, что одним из наиболее эффективных и экономически выгодных способов оптимизации минерального питания растений является применение почвенных микроорганизмов, в частности обладающих способностью к трансформации труднорастворимых соединений фосфора. Данный агроприем – один из перспективных и экологических способов повышения фосфорного питания сельскохозяйственных растений [9, 15, 48–50]. Положительное воздействие фосфатмобилизующих микроорганизмов на питание растений отмечала в своих работах Р. Менкина [51], позже на эти особенности указывали и другие исследователи [15, 22, 52, 53].

В литературных источниках имеются сведения о том, что применение фосфатмобилизующих бактерий способствует значительному улучшению фосфорного питания растений, о чем свидетельствуют анализы на содержание этого химического элемента в их вегетативной массе. Улучшение минерального питания растений, в свою очередь, способствует увеличению урожайности инокулированных растений. Рассмотрим результаты исследований, посвященных изучению данного аспекта жизнедеятельности почвенных микроорганизмов.

Так, при изучении фосфатмобилизующих бактерий, выделенных из ризосферы и ризопланы зерновых культур, Михайловская Н. А. и соавторы установили взаимосвязь их эффективности с содержанием подвижных форм фосфора в дерново-подзолистых рыхло- и связно-супесчаных почвах [54]. В условиях полевых экспериментов показано, что применение фосфатмобилизующих бактерий целесообразно на почвах с низкой обеспеченностью подвижными фосфатами

(200 мг/кг) – достоверная прибавка урожайности зерна составила 3,0–3,3 ц/га для озимой тритикале и 4,3–4,7 ц/га для яровой пшеницы.

В условиях модельных и полевых опытов белорусские исследователи установили положительное влияние предпосевной обработки семян штаммом *Agrobacterium radiobacter* 2258СМФ (основа биопрепарата «Фитостимифос») на содержание доступного для растений фосфора в ризосфере овощных культур [55]. Выявлено, что применение *A. radiobacter* 2258СМФ для инокуляции семян способствует увеличению степени подвижности почвенных фосфатов в ризосфере редиса, моркови, огурцов и гороха (в среднем на 20 %), а также возрастанию в среднем на 32 % урожайности перечисленных культур по сравнению с контролем. Подобный эффект установлен также и при инокуляции семян бобовых культур (овощная фасоль и овощные бобы): в ризосфере растений увеличилось содержание легкодоступных соединений фосфора и численность микроорганизмов, трансформирующих фосфаты кальция. При этом также возросла урожайность семян фасоли и бобов – на 10,1–11,0 и 9,6–9,9 ц/га соответственно

Проведены исследования по выделению и применению фосфатмобилизующих бактерий в почвенно-климатических условиях Забайкалья [56]. Показана перспектива использования штамма *Bacillus megatherium phosphaticus*, выделенного из пахотных каштановых почв, в качестве биоактиватора удобрений из минеральных агроруд (цеолита и фосфоритной муки). Применение полученных биологически активных удобрений способствовало повышению содержания НРК в ризосфере кормовых культур (овес на зеленую массу) и их урожайности: в первый год на 18–20 %, во второй – на 35–40 %, в третий – на 24–29 % по сравнению с контролем (без внесения удобрений).

Украинские ученые выделили новые штаммы *Rhizobium radiobacter*, изучили их свойства и показали перспективность применения для улучшения фосфорного питания озимой пшеницы [57, 58]. Доказано, что изучаемые штаммы способны сохраняться на бактеризованных семенах пшеницы и приживаться в корневой зоне растений. При определении степени подвижности фосфатов в ризосфере озимой пшеницы установлено, что содержание P_2O_5 в ризосфере инокулированных растений ниже, чем в контрольном варианте. Показано, что новые штаммы *R. radiobacter* способствуют увеличению численности фосфатмобилизующих бактерий в корневой зоне озимой пшеницы на ранних этапах развития растений (фазы кущения и цветения). Результаты полевых экспериментов показали, что урожайность зерна озимой пшеницы под действием *R. radiobacter* 1333 составила 4,4 т/га, а *R. radiobacter* 5006 – 4,2 т/га против 3,6 т/га в контрольном варианте. Прирост урожайности от бактеризации семян составил 0,6–0,7 т/га (17–20 %) к контролю.

В отделе сельскохозяйственной микробиологии ФГБУН «НИИСХ Крыма» проводят работы по селекции штаммов фосфатмобилизующих бактерий и созданию удобрительных препаратов на их основе [59, 60]. В процессе исследований из чернозема южного выделен и изучен эффективный штамм *Enterobacter nimipressuralis* 32-3. Установлено, что этот штамм является продуцентом фитогормонов, органических кислот и фермента (щелочной фосфатазы), способствующих превращению труднорастворимых фосфатов в соединения, усвояемые растениями. Применение биопрепарата на основе *E. nimipressuralis* 32-3 для предпосевной инокуляции семян зерновых культур (ярового ячменя и озимой пшеницы) не только повышает их продуктивность [61, 62], но и способствует увеличению содержания подвижных фосфатов в ризосфере озимой пшеницы [63].

В публикациях зарубежных авторов также отмечено положительное влияние фосфатрастворяющих бактерий на минеральное питание и продуктивность различных сельскохозяйственных культур: кукурузы [64], сои [65], пшеницы [66], ячменя [67],

вигны [68]. Имеются сведения о синергическом воздействии бактерий, трансформирующих труднорастворимые фосфаты и симбиотических азотфиксирующих бактерий на культурные растения [69]. Присутствие фосфатрастворяющих микроорганизмов в почве представляет собой основной путь для солюбилизации и высвобождения неорганических фосфатов в растворимые формы, которые могут быть непосредственно использованы растениями. Действительно, в механизмах солюбилизации Р может быть задействовано большое количество микроорганизмов, способных фиксировать атмосферный азот. Многие исследователи подчеркивают влияние микроорганизмов, растворяющих соединения фосфора, на симбиотическую фиксацию азота и использование наиболее эффективных штаммов для снижения деградации земель и улучшения устойчивого сельского хозяйства.

Так, определены синергические эффекты азотфиксирующих (*Mesorhizobium*) и фосфатрастворяющих ризобактерий (*Pseudomonas* и *Bacillus sp.*) на рост, урожайность, содержание белка в зерне и усвоение питательных веществ растениями нута в песчано-глинисто-суглинистой почве. Выявлено, что поглощение Р растениями было самым высоким (в 2,14 раза выше контроля) при совместной инокуляции (*M. ciceri* RC4 + *Azotobacter chroococcum* A10 + *Bacillus* PSB 9). Наиболее высокая концентрация N, а также его поглощение (на 81 % и 16 % выше контроля, соответственно) отмечена при тройной инокуляции (*M. ciceri* RC4 + *Azotobacter chroococcum* A10 + *Pseudomonas* PSB5) [70]. Отмечено также повышение урожайности семян нута благодаря инокуляции *M. ciceri* RC3 + *A. chroococcum* A4 + *Bacillus* PSB10 – она увеличилась на 250 % против контроля. При этом содержание белка в зерне инокулированных растений нута варьировало в пределах 180 (*Bacillus* PSB1) и 309 нг/г⁻¹ (*M. ciceri* RC3 + *A. chroococcum* A4 + *Bacillus* PSB10) [71]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что совместная инокуляция ризосферными бактериями способствует росту растений и повышению урожайности зерна, а также увеличению концентрации и поглощения N и Р нутом, выращенным в полевых условиях. Подобные результаты получены при изучении влияния совместной инокуляции клубеньковыми (*Sinorhizobium meliloti* B399) и фосфатрастворяющими (*Bacillus sp.* M7c) бактериями на рост и развитие люцерны. Выявлено значительное увеличение сухой массы корней и побегов, длины и площади поверхности корней, количества клубеньков и симбиотических свойств растений при синергическом воздействии ризобактерий [72].

В условиях вегетационных опытов исследовано влияние штамма ризобий Thal8 и штамма фосфатрастворяющих бактерий 54RB в совместной и моноинокуляции, с P₂O₅ и без него на пшеницу при выращивании в природной нестерилизованной супесчаной почве с дефицитом фосфора. Показано, что совместная и моноинокуляция с P₂O₅ значительно увеличила массу корней и побегов, высоту растений, длину колоса, урожайность зерна, содержание Р в семенах, содержание белка и сахара в листьях у тестируемой культуры. Полученные результаты свидетельствуют о том, что совместная и моноинокуляция вместе с внесением фосфорного удобрения повышают урожайность зерна пшеницы на 30–40 % по сравнению с применением только одного удобрения. Кроме того, выявлено, что двойная инокуляция (Thal8+54RB) без внесения фосфорного удобрения способствовала повышению зерновой продуктивности пшеницы до 20 % по сравнению с применением одних удобрений Р [73]. Также проведены исследования, в которых изучено влияние фосфатрастворяющих бактерий и арбускулярных микоризных (АМ) грибов (а также их взаимодействие) на урожайность пшеницы, изменения в биологической популяции микроорганизмов и фракциях неорганического фосфора в почве [74]. Эксперименты включали четыре типа почв (глина, глинистый суглинок, суглинок и супесь). Показано, что наибольшее количество сухого вещества в побегах пшеницы выявлено при её выращивании в

глинисто-суглинистой почве. Кроме того, совместное применение АМ грибов и фосфатрастворяющих бактерий способствовало увеличению не только выхода сухого вещества всходов, но и количества продуктивных колосьев и зерновой продуктивности пшеницы – на 52 %, 19 % и 26 % соответственно по сравнению с контролем.

Таким образом, для улучшения минерального и, в частности фосфорного питания растений, в технологиях выращивания большинства сельскохозяйственных культур целесообразно применять фосфатмобилизующие микроорганизмы, трансформирующие недоступные для растений фосфаты в усвояемые формы.

Микробные препараты на основе фосфатмобилизующих микроорганизмов.

Идея применения в сельском хозяйстве микроорганизмов, способных трансформировать труднорастворимые соединения фосфора, давно привлекает исследователей и специалистов-практиков. В начале 60-х годов прошлого столетия в Советском Союзе разработан биопрепарат «Фосфобактерин» на основе бактерии *Bacillus megaterium var. phosphaticum*, обладающей способностью активно мобилизовать фосфор из органических фосфатов. Предпосевная инокуляция семян «Фосфобактерином» позитивно влияла на рост и развитие растений, повышала их урожайность. Однако производство этого препарата было приостановлено [3].

В настоящее время во Всероссийском НИИ сельскохозяйственной микробиологии на основе природных штаммов микроорганизмов разработана линейка микробных препаратов, что обеспечивает их высокую экологическую безопасность. В частности, на основе фосфатмобилизующих бактерий создан биопрепарат «Агрофил», а также комплексный биопрепарат «Биовайс» [12]. Основой биопрепарата «Агрофил» является эффективный штамм почвенной бактерии *Agrobacterim*, способный растворять труднодоступные для растений минеральные соединения почвы (в первую очередь фосфаты), а также продуцировать антибиотики, ростстимулирующие вещества (аналоги ауксинов и гетероауксинов) и витамины. Многочисленные эксперименты показали, что «Агрофил» является эффективным средством повышения урожайности различных сельскохозяйственных культур: овощных (томат, перец, огурец, тыква, кабачок), столовых корнеплодов (редис, морковь, свекла), капусты (белокочанная, цветная, пекинская), зеленных (щавель, спаржа, ревень) и плодово-ягодных (земляника, смородина, крыжовник, вишня, слива, виноград) культур. Применение «Агрофила» обеспечивает повышение урожайности растений в пределах 15–40 %, а также ускоряет созревание продукции на 7–10 дней и увеличивает содержание в ней витаминов и каротина.

Биопрепарат комплексного действия «Биовайс» создан на основе консорциума высокоэффективных штаммов почвенных ассоциативных бактерий: *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus mucilaginous siliceous*, *Bacillus megatherium subtilis phosphaticum*. «Биовайс» рекомендован для предпосевной или предпосадочной обработки растений, а также для их опрыскивания и полива в период вегетации. Установлено, что применение этого биопрепарата не только повышает урожайность зерновых, овощных и плодово-ягодных культур, но и увеличивает доступность элементов питания из органоминеральных комплексов почвы, что способствует оптимизации минерального питания растений и снижению дозы внесения минеральных удобрений на 25–50 %. Кроме того, «Биовайс» повышает устойчивость растений к полеганию и засухе, а также улучшает качество продукции: увеличивает количество каротиноидов, углеводов, аскорбиновой кислоты и белка, снижает содержание нитратов.

Сотрудники отдела общей и почвенной микробиологии Института микробиологии и вирусологии имени Д. К. Заболотного разработали научные основы использования биосинтетического потенциала почвенных микроорганизмов и создали на их основе биопрепараты фитостимулирующего, антипаразитарного и

адаптогенного действия [75, 76]. Основой микробных препаратов являются живые культуры микроорганизмов и их метаболиты, стимулирующие рост и развитие растений, а также улучшающие минеральное питание и повышающие резистентность к биотическим и абиотическим стрессам. Одним из важных аспектов использования биопрепаратов является снижение применения или даже полный отказ от пестицидов, загрязняющих окружающую среду и продукты питания [77]. Обозначенные характеристики свойственны многим микробным препаратам, в том числе и созданным на основе фосфатмобилизующих микроорганизмов: «Экофосфорину», «Фосфобактерину», «Эковиталу».

Особенность комплексного биопрепарата «Эковитал» состоит в том, что в его состав входят четыре высокоэффективных штамма микроорганизмов, подобранных по оптимальному соотношению синтезируемых фитогормонов и активности ферментов нитрогеназного и фосфатазного комплексов [78]. Биопрепарат «Эковитал» содержит живые клетки трех штаммов высокоэффективных и конкурентоспособных азотфиксирующих клубеньковых бактерий (ризобий), специфических к определенному виду бобовых растений и один штамм фосфатмобилизующих бактерий *Bacillus megatherium*. Титр живых клеток симбиотических азотфиксирующих ризобий и фосфатмобилизующих бацилл в препарате составляет не менее $3-5 \times 10^9$ клеток/мл. «Эковитал» применяют для комплексной предпосевной инокуляции семян бобовых культур (сои, гороха, нута, люцерны, люпина, фасоли, донника, клевера, вики, чечевицы и др.) в условиях органического и интегрированного земледелия. Биопрепарат «Эковитал» – современный высокоэффективный экологически безопасный инокулянт, совмещающий азотфиксирующие, фосфатмобилизующие, ростстимулирующие и иммунопротекторные свойства микроорганизмов, обладает положительным последствием на микробиоту и плодородие почвы, а также повышает урожайность растений на 17–30 % и качество продукции [79].

Состав препарата «Экофосфорин» включает четыре штамма ростстимулирующих, азотфиксирующих свободноживущих и ассоциативных почвенных бактерий (*Azotobacter chroococcum*, *A. vinelandii*, *Agrobacterium radiobacter*) и один штамм фосфатмобилизующих почвенных бактерий *Bacillus megatherium* [80]. Бактерии, составляющие основу биопрепарата, способны фиксировать атмосферный азот и мобилизовать нерастворимые органические фосфаты, улучшать минеральное питание растений, стимулировать их рост и развитие благодаря обеспечению биологически активными веществами (витаминами, фитогормонами, жирными и органическими кислотами, аминокислотами, полисахаридами). «Экофосфорин» обладает последствием, проявляющемся в повышении плодородия почв, обогащении их азотом и фосфором, повышении структурированности, улучшении агрофизических, агрохимических и биологических свойств, формировании комплекса полезной микробиоты в ризосфере растений. Биопрепарат «Экофосфорин» применяют для инокуляции семян и обработки вегетирующих растений злаковых, технических и овощных культур; он обеспечивает повышение полевой всхожести и энергии прорастания семян на 10–20 %, способствует формированию развитой корневой системы и активной микробно-растительной ассоциации; интенсифицирует процесс фотосинтеза, при этом происходит повышение резистентности растений к фитопатогенам и стрессовым факторам, а также повышение урожайности растений на 15–35 % и улучшение качества продукции. Титр живых клеток ростстимулирующих азотфиксирующих и фосфатмобилизующих бактерий в препарате составляет не менее 5–7 млрд клеток/л.

«Фосфобактерин» («Биофосфорин») – высокоэффективный биопрепарат на основе ростстимулирующих фосфатмобилизующих почвенных бактерий, рекомендован для предпосевной инокуляции семян и обработки вегетирующих

растений злаковых, технических и овощных культур. В состав биопрепарата входят ростстимулирующие фосфатмобилизующие почвенные бактерии, принадлежащие к виду *Bacillus megatherium* и сбалансированный комплекс природных физиологически активных продуктов метаболизма бацилл: витамины группы В, фитогормоны (ауксины, цитокинины, гиббереллины), ферменты, органические кислоты. Титр живых клеток ростстимулирующих фосфатмобилизующих бактерий в препарате составляет не менее $0,5 \times 10^9$ клеток/мл. Эффективность биопрепарата «Фосфобактерин» («Биофосфорин») обеспечивает способность бактерий, входящих в его состав, минерализовать органические фосфаты, улучшать минеральное питание растений, повышать на 10–15 % всхожесть семян и скорость их прорастания, адаптировать проростки к неблагоприятным условиям окружающей среды и стимулировать их продуктивность благодаря веществам фитогормонального действия, а также повышать устойчивость растений к фитопатогенам и стрессам, увеличивать их урожайность и качество продукции. Применение данного биопрепарата в растениеводстве заменяет 50–60 кг/га минеральных фосфорных удобрений. Кроме того, содержание активного подвижного фосфора в ризосфере растений возрастает на 20–30 %, что способствует повышению продуктивности злаковых культур на 8–12 % с одновременным увеличением содержания протеина в зерне.

Важную работу по созданию биопрепаратов на основе бактерий, активно растворяющих минеральные фосфаты, провели ученые Института сельскохозяйственной микробиологии Национальной академии аграрных наук Украины: созданы два биопрепарата – «Альбобактерин» и «Полимиксобактерин» [81, 82]. «Альбобактерин» изготавливают на основе неспоровой палочки *Achromobacter album* 1122, «Полимиксобактерин» – на основе споровой палочки *Bacillus polymyxa* КВ. Оба штамма продуцируют органические кислоты (молочную, уксусную), стимуляторы роста (индолилуксусную и гибберелловую кислоты), витамины (цианокобаламин, тиамин). Применение этих препаратов для бактеризации семян сахарной свеклы способствует повышению их всхожести, стимуляции фосфорного питания инокулированных растений, увеличению урожайности на 6–40 % и на 3–10 ц/га выхода сахара. Кроме того, экспериментально установлено, что применение «Альбобактерина» и «Полимиксобактерина» в технологиях выращивания сахарной свеклы позволяет уменьшить количество вносимых минеральных фосфорных удобрений – до 30 кг/га. В дальнейшем исследователи этого института разработали также биопрепарат «Агробактерин» на основе выделенной фосфатмобилизующей бактерии *Agrobacterium radiobacter* 1333 [83], обладающий комплексом полезных свойств: он не только улучшает питание, рост и продуктивность растений, но и снижает пораженность люпина корневыми гнилями и фузариозным увяданием. Показано, что «Агробактерин» способствует улучшению фосфорного питания кукурузы в условиях полевых опытов на черноземе выщелоченном [84, 85].

Сотрудники отдела сельскохозяйственной микробиологии ФГБУН «НИИСХ Крыма» на основе фосфатмобилизующей бактерии *L. nimipressuralis* ССМ 32-3 создали биопрепарат «Фосфостим» для оптимизации минерального питания растений, стимуляции их роста и повышения урожайности [86].

Ученые Института микробиологии НАН Беларуси на основе фосфатмобилизующих бактерий создали препарат «Фитостимофос», обладающий не только фосфатмобилизующим действием, но также ростстимулирующим эффектом и рекомендованным для повышения урожайности различных сельскохозяйственных культур [87]. В последние годы белорусские исследователи разработали микробные препараты «АгроМик» и «Бактопин» [88]. «АгроМик» – комплексный биопрепарат, созданный на основе ассоциативных азотфиксирующих и фосфатмобилизующих бактерий *Agrobacterium sp.17*, *Pseudomonas sp. 10* и АМ грибов рода *Glomus*. Он

предназначен для предпосевной обработки семян и вегетирующих растений зерновых (тритикале), цветочных, декоративных хвойных и древесно-кустарниковых культур. Установлено, что применение биопрепарата «АгроМик» способствует повышению зерновой продуктивности тритикале на 7–24 %, увеличению высоты растений (сеянцев пузыреплодника – на 206 %, бархатцев – на 170 %). Кроме того, «АгроМик» благоприятствует более раннему наступлению фаз бутонизации и цветения у цветочных культур, а также улучшению продуктивности их цветения и стимуляции формирования корневой системы – в 15 раз и на 160 % соответственно. «Бактопин» – комплексный биопрепарат, созданный на основе азотфиксирующих (*Rhizobium aquatilis* БИМ В-704Д) и фосфатмобилизующих (*Pseudomonas putida* БИМ В-702Д) бактерий, а также АМ грибов рода *Glomus*. Биопрепарат «Бактопин» предназначен для предпосевной обработки семян и вегетирующих растений деревьев хвойных пород, а также цветочных и декоративных культур: хвойных и древесно-кустарниковых. Установлено, что применение данного микробного препарата способствует повышению приживаемости сеянцев сосны и ели в 2,0 и 1,3 раза соответственно, приросту бархатцев на 97–106 %, а у цветочных культур – более раннему началу фаз бутонизации и цветения, повышению продуктивности их цветения.

Таким образом, одним из перспективных приемов, позволяющим разрешить вопрос оптимизации фосфорного питания сельскохозяйственных культур путем мобилизации почвенных и остаточных фосфатов удобрений, является применение биопрепаратов на основе микроорганизмов, способных трансформировать труднорастворимые соединения фосфора в усвояемые для растений формы.

Литература

1. Завалин А. А. Биопрепараты, удобрения и урожай. М.: ВНИИА, 2005. 302 с.
2. Мікробіологічні аспекти оптимізації удобрення сільськогосподарських культур: Теорія і практика: монографія // За ред. Волкогон В. В. Київ: Аграрна наука, 2007. 144 с.
3. Патица В. П., Тихонович І. А., Філіп'єв І. Д., Гамаюнова В. В., Андрусенко І. І. Мікроорганізми і альтернативне землеробство. Київ: Урожай, 1993. 176 с.
4. Antoun H. Beneficial microorganisms for the sustainable use of phosphates in agriculture // Procedia Engineering. 2012. Vol. 46. P. 62–67. DOI:10.1016/j.proeng.2012.09.446.
5. Jain P., Khichi D. S. Phosphate solubilizing microorganism (PSM): an ecofriendly biofertilizer and pollution manager // Journal of Dynamics in Agricultural Research. 2014. Vol. 1(4). P. 23–28.
6. Walpola B. C., Yoon M.-H. Prospectus of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus availability in agricultural soils: a review // African Journal of Microbiology Research. 2012. Vol. 6(37). P. 6600–6605. DOI: 10.5897/AJMR12.889.
7. Khan A. A., Jilani G., Akhtar M. S., Saqlan S. M. N., Rasheedet M. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanism and their role in crop production // Journal of Agricultural Biology Sciences. 2009. Vol. 1. P. 48–58.
8. Тихонович І. А., Проворов Н. А. Сельскохозяйственная микробиология как основа экологически устойчивого агропроизводства: фундаментальные и прикладные аспекты // Сельскохозяйственная биология. 2011. № 3. С. 3–9.
9. Satyaprakash M., Nikitha T., Reddy E. U. B., Sadhana B., Satya Vani S. Phosphorous and phosphate solubilising bacteria and their role in plant nutrition: a review // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2017. Vol. 6(4). P. 2133–2144. DOI: 10.20546/ijcmas.2017.604.251.
10. Фосфатмобилизующие бактерии в агроценозах Крыма: монография // Под ред. Чайковской Л. А. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2018. 156 с.
11. Kalayu G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers // International Journal of Agronomy. Vol. 2019. Art. No. 4917256. DOI: 10.1155/2019/4917256.
12. Завалин А. А., Кожемяков А. П. Новые технологии и применение биопрепаратов комплексного действия. Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2010. 64 с.
13. Волкогон В. В. Біологічна меліорація ґрунтів. Традиційне і нове: практика // Сільськогосподарська мікробіологія: міжвідомчий тематичний науковий збірник. 2011. № 13. С. 7–22.
14. Кожемяков А. П., Лактионов Ю. В., Попова Т. А., Орлова А. Г., Кокорина А. Л., Вайшля О. Б., Агафонов Е. В., Гужвин С. А., Чураков А. А., Яковлева М. Т. Агротехнологические

основы создания усовершенствованных форм микробных препаратов для земледелия // Сельскохозяйственная биология. 2015. Т. 50. № 3. С. 369–376. DOI: 10.15389/agrobiol.2015.3.369rus.

15. Муромцев Г. С., Маршунова Г. Н., Павлова В. Ф., Зольникова Н. В. Роль почвенных микроорганизмов в фосфорном питании растений // Успехи микробиологии. 1985. Т. 20. С. 174–198.

16. Zaidi A., Khan M. S., Ahemad M., Oves M. Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria // Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica. 2009. Vol. 56(3). P. 263–284. DOI: 10.1556/AMicr.56.2009.3.6.

17. Ahmed N., Shahab S. Phosphate solubilization: their mechanism genetics and application // The Internet Journal of Microbiology. 2011. Vol. 9(1). P. 4408–4412. DOI:10.5580/2327.

18. Jones D. L., Oburger E. Solubilization of phosphorus by soil microorganisms // In Book: Phosphorus in action. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. P. 169–198. DOI: 10.1007/978-3-642-15271-9_7.

19. Rodriguez H., Fraga R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion // Biotechnology Advances. 1999. Vol. 17(4-5). P. 319–339.

20. Yadav B. K., Verma V. Phosphate solubilization and mobilization in soil through microorganisms under arid ecosystems // The Functioning of Ecosystems. 2012. Vol. 6. P. 94–108. DOI: 10.5772/35917.

21. Selvi K. B., Paul J. J. A., Vijaya V., Saraswathi K. Analyzing the efficacy of phosphate solubilizing microorganisms by enrichment culture techniques // Biochemistry and Molecular Biology Journal. 2017. Vol. 3. P. 1. DOI: 10.21767/2471-8084.100029.

22. Kumar A., Kumar A., Patel H. Role of microbes in phosphorus availability and acquisition by plants // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2018. Vol. 7 (5). P. 1344–1347. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.705.161.

23. Pradhan N., Sukla L. B. Solubilization of inorganic phosphate by fungi isolated from agriculture soil // African Journal of Biotechnology. 2005. Vol. 5. P. 850–854.

24. Khan M. S., Zaidi A., Wani P. A. Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture – a review // Agronomy for Sustainable Development. 2007. Vol. 27 (1). P. 29–43. DOI: 10.1051/agro:2006011.

25. Stevenson F. J., Cole M. A. Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. New York: John Wiley and Sons, 1999. 448 p.

26. Aseri G. K., Jain N., Tarafdar J. C. Hydrolysis of organic phosphate forms by phosphatases and phytase producing fungi of arid and semi-arid soils of India // American-Eurasian Journal of Agriculture and Environment Science. 2009. Vol. 5. P. 564–570.

27. Yu X., Liu X., Zhu T.H., Liu G. H., Mao C. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from walnut and their effect on growth and phosphorus mobilization // Biol. Fertil. Soils. 2011. Vol. 7(4). P. 437–446. DOI: 10.1007/s00374-011-0548-2.

28. Taurian T., Anzuay M. S., Angelini J. G., Tonelli M. L., Luduena L., Pena D., Inanez F., Fabra A. Phosphate-solubilizing peanut associated bacteria: screening for plant growth-promoting activities // Plant and Soil. Vol. 329 (1). P. 421–431. DOI: 10.1007/s11104-009-0168-x.

29. Song O. R., Lee S. J., Lee Y. S., Lee S. C., Kim K. K., Choi Y. L. Solubilization of insoluble inorganic phosphate by *Burkholderia cepacia* DA 23 isolated from cultivated soil // Brazilian Journal of Microbiology. 2008. Vol. 39. P. 151–156. DOI: 10.1590/S1517-83822008000100030.

30. Sharma K., Dak G., Agrawal A., Bhatnagar M., Sharma R. Effect of phosphate solubilizing bacteria on the germination of *Cicer arietinum* seeds and seedling growth // Journal of Herbal Medicine and Toxicology. 2007. Vol. 1. P. 61–63.

31. Prasanna A., Deepa V., Balakrishna M. P., Deecaraman M., Sridhar R., Dhandapani P. Insoluble phosphate solubilization by bacterial strains isolated from rice rhizosphere soils from Southern India // International journal of soil science. 2011. Vol. 6(2). P. 134–141. DOI: 10.3923/ijss.2011.134.141.

32. Islam M. T., Deora A., Hashidoko Y., Rahman A., Ito T., Tahara S. Isolation and identification of potential phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of *Oryza sativa* L. cv. BR29 of Bangladesh // Zeitschrift für Naturforschung. 2007. Vol. 62 p. P. 103–110. DOI: 10.1515/znc-2007-1-218.

33. Gulati A., Sharma N., Vyas P., Sood S., Rahi P., Pathania V., Prasad R. Organic acid production and plant growth promotion as a function of phosphate solubilization by *Acinetobacter rhizosphaerae* strain BIHB 723 isolated from the cold deserts of the trans-Himalayas // Archives of Microbiology. 2010. Vol. 192(11). P. 975–983. DOI:10.1007/s00203-010-0615-3.

34. Chen Z., Ma S., Liu L. Studies on phosphorus solubilizing activity of a strain of phosphobacteria isolated from chestnut type soil in China // Bioresource Technology. 2008. Vol. 99(14). P. 6702–6707. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.03.064.

35. Chen Y. P., Rekha P. D., Arun A. B., Shen F. T., Lai W. A., Young C. C. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities // Applied Soil Ecology. 2006. Vol. 34(1). P. 33–41. DOI: 10.1016/j.apsoil.2005.12.002.

36. Баранская М. И., Чайковская Л. А. Первичная оценка нововыделенных штаммов фосфатмобилизующих бактерий // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 1(25). С. 28–37. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-1-25-28-37.
37. Chung H., Park M., Madhaiyan M., Seshadri S., Song J., Cho H., Sa T. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of crop plants of Korea // Soil Biology and Biochemistry. 2005. Vol. 37(10). P.1970–1974. DOI: 10.1016/j.soilbio.2005.02.025.
38. Abril A., Zurdo-Pineiro J. L., Peis A., Rivas R., Velazquez E. Solubilization of phosphate by a strain of *Rhizobium leguminosarium* bv trifolii isolated from Phaseolus vulgaris in El Chaco Arido soil (Argentina) // First International Meeting on Microbial Phosphate Solubilization: Developments in Plant and Soil Sciences. Editors E. Velázquez, C. Rodríguez-Barrueco. 2007. Vol. 102. P. 135–138. DOI: 10.1007/978-1-4020-5765-6_19.
39. Alikhani H. A., Saleh-Rastin N., Antoun H. Phosphate solubilization activity of rhizobia native to Iranian soils // Plant and Soil. 2007. P.135–138. DOI: 10.1007/978-1-4020-5765-6_4.
40. Son H.-J., Park G.-T., Cha M.-S., Heo M.-S. Solubilization of insoluble inorganic phosphates by a novel salt- and pH-tolerant *Pantoea agglomerans* R-42 isolated from soybean rhizosphere // Bioresource Technology. 2006. Vol. 97(2). P. 204–210. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.02.021.
41. Hamdali H., Hafidi M., Virolle M. J., Ouhdouch Y. Rock phosphate solubilizing Actinomycetes: Screening for plant growth promoting activities // World Journal Microbiology and Biotechnology. 2008. Vol. 24(11). P. 2565–2575. DOI: 10.1007/s11274-008-9817-0.
42. Khan M. S., Zaidi A., Ahemad M., Oves M., Wani P. A. Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi-current perspective // Archives of Agronomy and Soil Science. 2010. Vol. 56(1). P. 73–98. DOI:10.1080/03650340902806469.
43. Xiao C., Chi R., Li X., Xia M., Xia Z. Biosolubilization of rock phosphate by three stress-tolerant fungal strains // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2011. Vol. 165. P. 719–727. DOI: 10.1007/s12010-011-9290-3.
44. Mittal V., Singh O., Nayyar H., Kaur J., Tewari R. Stimulatory effect of phosphate solubilizing fungal strains (*Aspergillus awamori* and *Penicillium citrinum*) on the yield of chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. GPF2) // Soil Biology and Biochemistry. 2008. Vol. 40(3). P. 718–727. DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.10.008.
45. Sane S. A., Mehta S. K. Isolation and evaluation of rock phosphate solubilizing fungi as potential biofertilizer // Journal of Fertilizers and Pesticides. 2015. Vol. 6. P. 156.
46. Xiao C., Chi R., He H., Qiu G., Wang D., Zhang W. Isolation of phosphate solubilizing fungi from phosphate mines and their effect on wheat seedling growth // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2009. Vol. 159 (2). Vol. 159. P. 330–342. DOI: 10.1007/s12010-009-8590-3.
47. Singh H., Reddy M. S. Effect of inoculation with phosphate solubilizing fungus on growth and nutrient uptake of wheat and maize plants fertilized with rock phosphate in alkaline soils // European Journal of Soil Biology. 2011. Vol. 47. P. 30–34. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2010.10.005.
48. Richardson A. E., Simpson R. J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability // Plant Physiology. 2011. Vol. 156. No. 3. P. 989–996. DOI: 10.1104/pp.111.175448.
49. Khan M. S., Zaidi A., Musarrat J. Phosphate solubilizing microorganisms: principles and application of microphos technology. Springer International Publishing, 2014. 307 p. DOI: 10.1007/978-3-319-08216-5.
50. Кудоярова Г. Р., Высоцкая Л. Б., Архипова Т. Н., Кузьмина Л. Ю., Галимзянова Н. Ф., Сидорова Л. В., Габбасова И. М., Мелентьев А. И. Влияние ауксинпродуцирующих и фосфатмобилизующих бактерий на подвижность почвенного фосфора, скорость роста растений пшеницы и усвоение ими фосфора // Агрoхимия. 2016. № 5. С. 28–34.
51. Менкина Р. А. Роль *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* в питании растений // Труды Института микробиологии АН СССР. 1961. Т. 11. С. 238–245.
52. Sharma S. B., Sayyed R. Z., Trivedi M. H., Gobi T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils // Springer Plus. 2013. Vol. 2. P. 587. DOI: 10.1186/2193-1801-2-587.
53. Thakur D., Kaushal R., Shyam V. Phosphate solubilising microorganisms: role in phosphorus nutrition of crop plants – a review // Agricultural Reviews. 2014. Vol. 35 (3). P. 159–171. DOI: 10.5958/0976-0741.2014.00903.9.
54. Михайловская Н. А., Миканова О. Н., Барашенко Т. Б., Тарасюк Е. Г., Дюсова С. В. Свойства фосфат-мобилизующих бактерий и их влияние на урожайность зерновых культур на дерново-подзолистых почвах // Почвоведение и агрохимия. 2011. № 2(47). С. 120–129.
55. Босак В. Н., Сафронова Г. В., Алещенкова З. М., Минюк О. Н. Способ оптимизации фосфатного режима почвы при возделывании сельскохозяйственных культур // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты. Сборник научных трудов. 2016. Т. 8. С. 148–161.

56. Меркушева М. Г., Убугунов Л. Л., Болонева Л. Н., Нимаева М.-Б. М., Мангатаев Ц. Д., Бадмаев А. Б. Фосфатмобилизующие микроорганизмы как биологические активаторы удобрений из агрурод // Плодородие. 2008. №1. С. 23–24.
57. Трещач А. О., Токмакова Л. М., Ларченко І. В. Ефективність бактеризації пшениці озимої фосфатмобілізуючими бактеріями // Агрохімія і ґрунтознавство. Спецвипуск до VIII з'їзду УТГА. 2010. Кн. 3. С. 340–344.
58. Трещач А. О., Токмакова Л. М. Роль бактерії *Rhizobium radiobacter* у підвищенні фосфорного живлення пшениці озимою // VII наукова конференція молодих вчених «Мікробіологія в сучасному сільськогосподарському виробництві». Чернігів: ЦНТЕІ, 2010. С. 43–45.
59. Чайковская Л. А. Научное обоснование биологической мобилизации фосфора в агроэкосистемах южной Степи Украины. Автореф. дисс. ... докт. с.-х. наук. Киев: Национальный аграрный университет, 2004. 37 с.
60. Chaikovskaya L. A., Baranskaya M. I. The mechanism of action of rhizobacteria *Enterobacter nimipressuralis* 32-3 on the mineral nutrition and productivity of soybean // Annual Research & Review in Biology. 2017. Vol. 14. Iss. 5. DOI: 10.9734/ARRB/2017/33934.
61. Баранская М. И. Эффективность биопрепаратов фосфатмобилизующих бактерий при выращивании ярового ячменя в условиях южной Степи Украины. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Чернигов: Институт сельскохозяйственной микробиологии УААН, 2010. 20 с.
62. Ключенко В. В. Фосфатмобилизующие бактерии в агроценозах пшеницы озимой южной Степи Украины. Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Умань: Уманский национальный университет садоводства, 2012. 22 с.
63. Чайковська Л. О., Ключенко В. В., Овсієнко О. Л. Поживний режим чорнозему південного за впливу мікробних препаратів та мінеральних добрив // Науковий вісник Чернівецького університету. Біологія (Біологічні системи). 2012. Т. 4. Вип. 3. С. 344–347.
64. Nameeda B., Harini G., Rupela O.P., Wani S.P., Reddy G. Growth promotion of maize by phosphate-solubilizing bacteria isolated from composts and macrofauna // Microbiological Research. 2008. Vol. 163(2). P. 234–242. DOI:10.1016/j.micres.2006.05.009.
65. Fernandez L. A., Zalba P., Gomez M.A., Sagarido M. A. Phosphate solubilization activity of bacterial strains in soil and their effect on soybean growth under greenhouse conditions // Biology and Fertility of Soils. 2007. Vol. 43(6). P. 805–809. DOI: 10.1007/s00374-007-0172-3.
66. Afzal A., Ashraf M., Asad S. A., Farooq M. Effect of phosphate solubilizing microorganisms on phosphorus uptake, yield and yield traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) in rainfed area // International Journal of Agriculture and Biology. 2005. Vol. 7(2). P.1560–8530.
67. Mehrvarz S., Chaichi M. R., Alikhani H. A. Effects of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus chemical fertilizer on yield and yield components of barely (*Hordeum vulgare* L.) // American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science. 2008. Vol. 3. P. 822–828.
68. Vikram A., Hamzehzarghani H. Effect of phosphate solubilizing bacteria on nodulation and growth parameters of green gram (*Vigna radiate* L. Wilczek) // Research Journal of Microbiology. 2007. Vol. 3(2). P. 62–72. DOI: 10.3923/jm.2008.62.72.
69. Hajjam Y., Cherkaoui S. The influence of phosphate solubilizing microorganisms on symbiotic nitrogen fixation: perspectives for sustainable agriculture // Journal of Materials and Environmental Sciences. 2017. Vol. 8. P. 801–808.
70. Wani P., Khan M., Zaidi A. Synergistic effects of the inoculation with nitrogen fixing and phosphate solubilizing rhizobacteria on the performance of field grown chickpea // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2007. Vol. 170. P. 283–287. DOI: 10.1002/JPLN.200620602.
71. Wani P., Khan M., Zaidi A. Co-inoculation of nitrogen fixing and phosphate solubilizing bacteria to promote growth, yield and nutrient uptake in chickpea // Acta Agronomica Hungarica 2007. Vol. 55. P. 315–323. DOI:10.1556/AAgr.55.2007.3.7.
72. Guiñazú L. B., Andrés J. A., MFDel P., Pistorio M., Rosas S. B. Response of alfalfa (*Medicago sativa* L.) to single and mixed inoculation with phosphate-solubilizing bacteria and *Sinorhizobium meliloti* // Biology and Fertility of Soils. 2009. Vol. 46(2). P. 185–190. DOI: 10.1007/s00374-009-0408-5.
73. Afzal A., Bano A. Rhizobium and phosphate solubilizing bacteria improve the yield and phosphorus uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) // International Journal of Agriculture and Biology. 2008. Vol. 10(1). P. 85–88.
74. Yousefi A., Khavazi K., Moezi A., Rejali F., Nadian H. Phosphate solubilizing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi impacts on inorganic phosphorus fractions and wheat growth // World Applied Sciences Journal. 2011. Vol. 15. P. 1310–1318.
75. Иутинская Г. А. Биотехнологический потенциал почвенных бактерий – основы микробных препаратов для растениеводства // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты. Сборник научных трудов. 2013. Т. 5. С. 235–244.

76. Іутинська Г. О., Білявська Л. О., Титова Л. В., Леонова Н. О., Ямборко Н. А., Петрук Т. В., Вознюк С. В. Мікробні препарати для рослинництва. Методичні рекомендації. Київ: ІМВ НАНУ, 2017. 83 с.
77. Биорегуляция микробно-растительных систем // Под ред. Иутинской Г. А., Пономаренко С. П. Киев: Ничлава, 2010. 464 с.
78. Патент України на винахід №101388. Комплексний мікробний препарат Ековітал для інокуляції насіння бобових культур // Автори: Титова Л. В., Леонова Н. О., Бровко І. С., Іутинська Г. О. Публ. 25.03.2013. Бюл. № 6.
79. Вознюк С. В., Титова Л. В., Ляска С. І., Іутинська Г. О. Вплив бактеріального препарату Ековітал у комплексі з сучасними фунгіцидами на ризосферний мікробіоценоз, стійкість до грибних патогенів і продуктивність сої // Мікробіологічний журнал. 2015. № 77(4). С. 8–14.
80. Патент України на винахід № 105276. Комплексний бактеріальний препарат Екофосфорин для обробки культурних рослин // Автори: Титова Л. В., Іутинська Г. О., Бровко І. С. Публ. 25.04.2014. Бюл. № 8.
81. Токмакова Л. Н. Штаммы *Bacillus polymyxa* и *Achromobacter album* – основа для создания бактеріальних препаратів // Мікробіологічний журнал. 1997. Т. 59. № 4. С.131–138.
82. Токмакова Л. М. Мікробні препарати для поліпшення фосфорного живлення, підвищення урожайності та цукристості коренеплодів цукрових буряків // Сільськогосподарська мікробіологія: Міжвідомчий тематичний науковий збірник. 2006. Вип. № 4. С. 126–136.
83. Близнюк Н. М., Токмакова Л. М., Лепеха О. П. Вплив агробактерину на ураженість кореневими гнилями і фузаріозним в'яненням рослин люпину жовтого, урожай та якість продукції// Фосфор і калій у землеробстві. Проблеми мікробіологічної мобілізації. Збірник наукових праць. 2004. С. 5–9.
84. Токмакова Л. М., Трепач А. О., Лепеха О. П. Вплив фосфатмобілізуювальних бактерій на фосфорне живлення пшениці озимої // Агрохімія і ґрунтознавство. Спецвипуск до VIII з'їзду УТГА. 2010. Кн. 3. С. 339–340.
85. Токмакова Л. М. Лабораторія біологічного фосфору. Результати досліджень // Сільськогосподарська мікробіологія: здобутки та перспективи. Збірник наукових праць (до 50-річчя від дня заснування ІСГМ НААН). 2011. С. 31–35.
86. Патент РФ № 2676926. «Фосфатмобілізуючий штамм почвенных бактерий *Lelliottia nimirpressuralis* ССМ 32-3 и биопрепарат на его основе для оптимизации минерального питания растений, стимуляции их роста и повышения урожайности» // Авторы: Чайковская Л. А., Мельничук Т. Н., Каменева И. А., Баранская М. И., Овсиенко О. Л. 2019. Бюлл. № 2. 12 с. 15.
87. Суховицкая Л. А. Фосфатмобілізуючі мікроорганізми і біофосфор в практиці сільськогосподарства Білорусі // Фосфор і калій у землеробстві. Проблеми мікробіологічної мобілізації. Збірник наукових праць. 2004. С. 135–140.
88. Алещенкова З. Микробные удобрения для стимуляции роста и развития растений // Наука и инновации. 2015. № 8(150). С. 66–67.

References

1. Zavalin A. A. Bio-preparations, fertilizers and harvest. Moscow: All-Russian scientific-research institute of agrochemistry named by D.N. Pryanishnikov Publ., 2005. 302 p.
2. Microbiological aspects of crop fertilizer optimization: theory and practice: monograph // Ed. by Volkogon V. V. Kiev: Agrarna nauka, 2007. 144 p.
3. Palyka V. P., Tykhonovych I. A., Filipyev I. D., Gamayunova V. V., Andrusenko I. I. Microorganisms and alternative agriculture. Kiev: Urozhay, 1993. 176 p.
4. Antoun H. Beneficial microorganisms for the sustainable use of phosphates in agriculture // Procedia Engineering. 2012. Vol. 46. P. 62–67. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.446.
5. Jain P., Khichi D. S. Phosphate solubilizing microorganism (PSM): an ecofriendly biofertilizer and pollution manager // Journal of Dynamics in Agricultural Research. 2014. Vol. 1(4). P. 23–28.
6. Walpolo B. C., Yoon M.-H. Prospectus of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus availability in agricultural soils: a review // African Journal of Microbiology Research. 2012. Vol. 6(37). P. 6600–6605. DOI: 10.5897/AJMR12.889.
7. Khan A. A., Jilani G., Akhtar M. S. Saqlan S. M. N., Rasheedet M. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production // Journal of Agricultural Biology Sciences. 2009. Vol. 1. P. 48–58.
8. Tikhonovich I. A., Provorov N. A. Agricultural microbiology as the basis of ecologically sustainable agriculture: fundamental and applied aspects // Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]. 2011. Vol. 3. P. 3–9.

9. Satyaprakash M., Nikitha T., Reddy E. U. B., Sadhana B., Satya Vani S. Phosphorous and phosphate solubilising bacteria and their role in plant nutrition: a review // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2017. Vol. 6(4). P. 2133–2144. DOI: 10.20546/ijcmas.2017.604.251.
10. Phosphate-mobilizing bacteria in the agrocenosis of Crimea: monograph // Ed. by Chaikovskaya L. A. Simferopol: Publishing house “ARIAL”, 2018. 156 p.
11. Kalayu G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers // International Journal of Agronomy. Vol. 2019. Art. No. 4917256. DOI: 10.1155/2019/4917256.
12. Zavalin A. A., Kozhemyakov A. P. New technologies and complex biological products application. Saint Petersburg: HIMIZDAT, 2010. 64 p.
13. Volkogon V. V. Biological melioration of soils. Traditional and new // Agricultural Microbiology. 2011. Vol. 13. P. 7–22.
14. Kozhemyakov A. P., Laktionov Yu. V., Popova T. A., Orlova A. G., Kokorina A. L., Vaishlya O. B. Agafonov E.V., Guzhvin S.A., Churakov A.A., Yakovleva M.T. The scientific basis for the creation of new forms of microbial biochemicals // Sel'skokhozyaistvennaya Biologia [Agricultural Biology]. 2015. Vol. 50(3). P. 369–376. DOI: 10.15389/agrobiol.2015.3.369rus.
15. Muromtsev G. S., Marshunova G. N., Pavlova V. F., Zolnikova N. V. Role of soil microorganisms in phosphorus nutrition of plants // Uspekhi mikrobiologii. 1985. Vol. 20. P. 174–198.
16. Zaidi A., Khan M. S., Ahemad M., Oves M. Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria // Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica. 2009. Vol. 56(3). P. 263–284. DOI: 10.1556/AMicr.56.2009.3.6.
17. Ahmed N., Shahab S. Phosphate solubilization: their mechanism genetics and application // The Internet Journal of Microbiology. 2011. Vol. 9(1). P. 4408–4412. DOI: 10.5580/2327.
18. Jones D. L., Oburger E. Solubilization of phosphorus by soil microorganisms // In Book: Phosphorus in action. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. P. 169–198. DOI: 10.1007/978-3-642-15271-9_7.
19. Rodriguez H., Fraga R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion // Biotechnology Advances. 1999. Vol. 17(4-5). P. 319–339.
20. Yadav B. K., Verma V. Phosphate solubilization and mobilization in soil through microorganisms under arid ecosystems // The Functioning of Ecosystems. 2012. Vol. 6. P. 94–108. DOI: 10.5772/35917.
21. Selvi K. B., Paul J. J. A., Vijaya V., Saraswathi K. Analyzing the efficacy of phosphate solubilizing microorganisms by enrichment culture techniques // Biochemistry and Molecular Biology Journal. 2017. Vol. 3. P. 1. DOI: 10.21767/2471-8084.100029.
22. Kumar A., Kumar A., Patel H. Role of microbes in phosphorus availability and acquisition by plants // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2018. Vol. 7 (5). P. 1344–1347. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.705.161.
23. Pradhan N., Sukla L. B. Solubilization of inorganic phosphate by fungi isolated from agriculture soil // African Journal of Biotechnology. 2005. Vol. 5. P. 850–854.
24. Khan M. S., Zaidi A., Wani P. A. Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture – a review // Agronomy for Sustainable Development. 2007. Vol. 27 (1). P. 29–43. DOI: 10.1051/agro:2006011.
25. Stevenson F. J., Cole M. A. Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. New York: John Wiley and Sons, 1999. 448 p.
26. Aseri G. K., Jain N., Tarafdar J. C. Hydrolysis of organic phosphate forms by phosphatases and phytase producing fungi of arid and semi-arid soils of India // American-Eurasian Journal of Agriculture and Environment Science. 2009. Vol. 5. P. 564–570.
27. Yu X., Liu X., Zhu T. H., Liu G. H., Mao C. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from walnut and their effect on growth and phosphorus mobilization // Biol. Fertil. Soils. 2011. Vol. 7(4). P. 437–446. DOI: 10.1007/s00374-011-0548-2.
28. Taurian T., Anzuay M. S., Angelini J. G., Tonelli M. L., Luduena L., Pena D., Inanez F., Fabra A. Phosphate-solubilizing peanut associated bacteria: screening for plant growth-promoting activities // Plant and Soil. 2010. Vol. 329 (1). P. 421–431. DOI:10.1007/s11104-009-0168-x.
29. Song O. R., Lee S. J., Lee Y. S., Lee S. C., Kim K. K., Choi Y. L. Solubilization of insoluble inorganic phosphate by *Burkholderia cepacia* DA 23 isolated from cultivated soil // Brazilian Journal of Microbiology. 2008. Vol. 39. P. 151–156. DOI: 10.1590/S1517-83822008000100030.
30. Sharma K., Dak G., Agrawal A., Bhatnagar M., Sharma R. Effect of phosphate solubilizing bacteria on the germination of *Cicer arietinum* seeds and seedling growth // Journal of Herbal Medicine and Toxicology. 2007. Vol. 1. P. 61–63.
31. Prasanna A., Deepa V., Balakrishna M. P., Deecaraman M., Sridhar R., Dhandapani P. Insoluble phosphate solubilization by bacterial strains isolated from rice rhizosphere soils from Southern India // International Journal of Soil Science. 2011. Vol. 6(2). P. 134–141. DOI: 10.3923/ijss.2011.134.141.

32. Islam M. T., Deora A., Hashidoko Y., Rahman A., Ito T., Tahara S. Isolation and identification of potential phosphate solubilizing bacteria from the rhizoplane of *Oryza sativa* L. cv. BR29 of Bangladesh // Zeitschrift für Naturforschung. 2007. Vol. 62 p. P. 103–110. DOI: 10.1515/znc-2007-1-218.
33. Gulati A., Sharma N., Vyas P., Sood S., Rahi P., Pathania V., Prasad R. Organic acid production and plant growth promotion as a function of phosphate solubilization by *Acinetobacter rhizosphaerae* strain BIHB 723 isolated from the cold deserts of the trans-Himalayas // Archives of Microbiology. 2010. Vol. 192(11). P. 975–983. DOI:10.1007/s00203-010-0615-3.
34. Chen Z., Ma S., Liu L. Studies on phosphorus solubilizing activity of a strain of phosphobacteria isolated from chestnut type soil in China // Bioresource Technology. 2008. Vol. 99(14). P. 6702–6707. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.03.064.
35. Chen Y. P., Rekha P. D., Arun A. B., Shen F. T., Lai W. A., Young C. C. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities // Applied Soil Ecology. 2006. Vol. 34(1). P. 33–41. DOI: 10.1016/j.apsoil.2005.12.002.
36. Baranskaya M. I., Chaikovskaya L.A Primary evaluation of newly isolated strains of phosphate-mobilizing bacteria // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2021. No. 1(25). P. 28–37. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-1-25-28-37.
37. Chung H., Park M., Madhaiyan M., Seshadri S., Song J., Cho H., Sa T. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of crop plants of Korea // Soil Biology and Biochemistry. 2005. Vol. 37(10). P.1970–1974. DOI: 10.1016/j.soilbio.2005.02.025.
38. Abril A., Zurdo-Pineiro J. L., Peis A., Rivas R., Velazquez E. Solubilization of phosphate by a strain of *Rhizobium leguminosarium* bv trifolii isolated from *Phaseolus vulgaris* in EI Chaco Arido soil (Argentina) // First International Meeting on Microbial Phosphate Solubilization: Developments in Plant and Soil Sciences. Editors E. Velázquez, C. Rodríguez-Barrueco. 2007. Vol. 102. P. 135–138. DOI:10.1007/978-1-4020-5765-6_19
39. Alikhani H. A., Saleh-Rastin N., Antoun H. Phosphate solubilization activity of rhizobia native to Iranian soils // Plant and Soil. 2007. P.135–138. DOI: 10.1007/978-1-4020-5765-6_4.
40. Son H.-J., Park G.-T., Cha M.-S., Heo M.-S. Solubilization of insoluble inorganic phosphates by a novel salt- and pH-tolerant *Pantoea agglomerans* R-42 isolated from soybean rhizosphere // Bioresource Technology. 2006. Vol. 97(2). P. 204–210. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.02.021.
41. Hamdali H., Hafidi M., Virolle M. J., Ouhdouch Y. Rock phosphate solubilizing *Actinomycetes*: Screening for plant growth promoting activities // World Journal Microbiology and Biotechnology. 2008. Vol. 24(11). P. 2565–2575. DOI: 10.1007/s11274-008-9817-0.
42. Khan M. S., Zaidi A., Ahemad M., Oves M., Wani P. A. Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi-current perspective // Archives of Agronomy and Soil Science. 2010. Vol. 56(1). P. 73–98. DOI: 10.1080/03650340902806469.
43. Xiao C., Chi R., Li X., Xia M., Xia Z. Biosolubilization of rock phosphate by three stress-tolerant fungal strains // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2011. Vol. 165. P. 719–727. DOI: 10.1007/s12010-011-9290-3.
44. Mittal V., Singh O., Nayyar H., Kaur J., Tewari R. Stimulatory effect of phosphate solubilizing fungal strains (*Aspergillus awamori* and *Penicillium citrinum*) on the yield of chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. GPF2) // Soil Biology and Biochemistry. 2008. Vol. 40(3). P. 718–727. DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.10.008.
45. Sane S. A., Mehta S. K. Isolation and evaluation of rock phosphate solubilizing fungi as potential biofertilizer // Journal of Fertilizers and Pesticides. 2015. Vol. 6. P. 156.
46. Xiao C., Chi R., He H., Qiu G., Wang D., Zhang W. Isolation of phosphate solubilizing fungi from phosphate mines and their effect on wheat seedling growth // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2009. Vol. 159 (2). P. 330–342. DOI: 10.1007/s12010-009-8590-3.
47. Singh H., Reddy M. S. Effect of inoculation with phosphate solubilizing fungus on growth and nutrient uptake of wheat and maize plants fertilized with rock phosphate in alkaline soils // European Journal of Soil Biology. 2011. Vol. 47. P. 30–34. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2010.10.005.
48. Richardson A. E., Simpson R. J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability // Plant Physiology. 2011. Vol. 156. No. 3. P. 989–996. DOI: 10.1104/pp.111.175448.
49. Khan M. S., Zaidi A., Musarrat J. Phosphate solubilizing microorganisms: principles and application of microphos technology. Springer International Publishing, 2014. 307 p. DOI: 10.1007/978-3-319-08216-5.
50. Kudoyarova G. R., Vysotskaya L. B., Arkhipova T. N., Kuz'mina L. Yu., Galimzyanova N. F., Sidorova L. V., Gabbasova I. M., Melent'ev A. I. The effect of auxin-producing and phosphate-mobilizing bacteria on the mobility of soil phosphorus, the growth rate of wheat plants and their absorption of phosphorus// Agrohimia. 2016. No. 5. P. 28–34.
51. Menkina R. A. Role of *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* in plant nutrition // Trudy Instituta mikrobiologii AN SSSR. 1961. Vol. 11. P. 238–245.

52. Sharma S. B., Sayyed R. Z., Trivedi M. H., Gobi T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils // Springer Plus. 2013. Vol. 2. P. 587. DOI: 10.1186/2193-1801-2-587.
53. Thakur D., Kaushal R., Shyam V. Phosphate solubilising microorganisms: role in phosphorus nutrition of crop plants – a review // Agricultural Reviews. 2014. Vol. 35 (3). P. 159–171. DOI: 10.5958/0976-0741.2014.00903.9.
54. Mikhailouskaya N. A., Mikanova O., Barashenko T. B., Tarasiuk E. G., Duysova S. V. Properties of phosphorus-mobilizing bacteria and their effect on cereal crop yields on luvisol loamy sand soils // Soil Science and Agrochemistry. 2011. No. 2(47). P.120–129.
55. Bosak V. N., Safronova G. V., Aleschenkova Z. M., Minyuk O. N. Method for optimizing the phosphate regime of soil to cultivate agricultural crops // Microbial biotechnologies: fundamental and applied aspects. Collection of scientific papers. 2016. Vol. 8. P. 148–161.
56. Merkusheva M. G., Ubugunov L. L., Boloneva L. N., Nimaeva M-B. M., Mangataev Ts. D., Badmaev A. B. Phosphate-mobilizing microorganisms as biological activators of fertilizers from agricultural ores // Plodorodie. 2008. No. 1. P. 23-24.
57. Trepach A. O., Tokmakova L. M., Larchenko I. V. Efficiency of bacterization of winter wheat by phosphate-mobilizing bacteria // Agrochemistry and soil science. Special issue for the VIII Congress of UTGA. 2010. Book. 3. P. 340–344.
58. Trepach A. O., Tokmakova L.M. Role of *Rhizobium radiobacter* in increasing the phosphorus nutrition of winter wheat // VII Scientific Conference of Young Scientists “Microbiology in modern agricultural production”. Chernihiv: CNTEI, 2010. P. 43–45.
59. Chaykovska L. A. Scientific principles of the biological mobilization of phosphorus in the agroecosystems of southern Steppe of Ukraine. Authors’ abstract ... Dr. Sc. (Agr.). Kiev: National Agrarian University, 2004. 37 p.
60. Chaikovskaya L. A., Baranskaya M. I. The mechanism of action of rhizobacteria *Enterobacter nimipressuralis* 32-3 on the mineral nutrition and productivity of soybean // Annual Research & Review in Biology. 2017. Vol. 14. Iss. 5. DOI: 10.9734/ARRB/2017/33934.
61. Baranskaya M. I. Effect of biopreparations based on phosphate mobilizing bacteria when growing spring barley in the southern Steppe of Ukraine. Authors’ abstract ... Cand. Sc. (Agr.). Chernigov: Institute of Agricultural Microbiology UAAS, 2010. 20 p.
62. Klyuchenko V. V. Phosphate mobilizing bacteria in the agrocenosis of winter wheat of the southern Steppe of Ukraine. Authors’ abstract ... Cand. Sc. (Agr.). Uman: National University of Horticulture, 2012. 22 p.
63. Chaikovska L. O., Klyuchenko V. V., Ovsienko O. L. Nutritional regime of southern chernozem under the influence of microbial preparations and mineral fertilizers // Scientific Herald of Chernivtsy University. Biology (Biological Systems). 2012. Vol. 4. Iss. 3. P. 344–347.
64. Hameeda B., Harini G., Rupela O.P., Wani S.P., Reddy G. Growth promotion of maize by phosphate-solubilizing bacteria isolated from composts and macrofauna // Microbiological Research. 2008. Vol. 163(2). P. 234–242. DOI: 10.1016/j.micres.2006.05.009.
65. Fernandez L. A., Zalba P., Gomez M.A., Sagardoy M. A. Phosphate solubilization activity of bacterial strains in soil and their effect on soybean growth under greenhouse conditions // Biology and Fertility of Soils. 2007. Vol. 43(6). P. 805–809. DOI: 10.1007/s00374-007-0172-3.
66. Afzal A., Ashraf M., Asad S. A., Farooq M. Effect of phosphate solubilizing microorganisms on phosphorus uptake, yield and yield traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) in rainfed area // International Journal of Agriculture and Biology. 2005. Vol. 7(2). P.1560–8530.
67. Mehrvarz S., Chaichi M.R., Alikhani H.A. Effects of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus chemical fertilizer on yield and yield components of barely (*Hordeum vulgare* L.) // American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science. 2008. Vol. 3. P. 822–828.
68. Vikram A., Hamzehzarghani H. Effect of phosphate solubilizing bacteria on nodulation and growth parameters of green gram (*Vigna radiate* L. Wilczek) // Research Journal of Microbiology. 2007. Vol. 3(2). P. 62–72. DOI: 10.3923/jm.2008.62.72.
69. Hajjam Y., Cherkaoui S. The influence of phosphate solubilizing microorganisms on symbiotic nitrogen fixation: perspectives for sustainable agriculture // Journal of Materials and Environmental Sciences. 2017. Vol. 8. P. 801–808.
70. Wani P., Khan M., Zaidi A. Synergistic effects of the inoculation with nitrogen fixing and phosphate solubilizing rhizobacteria on the performance of field grown chickpea // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2007. Vol. 170. P. 283–287. DOI: 10.1002/JPLN.200620602.
71. Wani P., Khan M., Zaidi A. Co-inoculation of nitrogen fixing and phosphate solubilizing bacteria to promote growth, yield and nutrient uptake in chickpea // Acta Agronomica Hungarica. 2007. Vol. 55. P. 315–323. DOI: 10.1556/AAgr.55.2007.3.7.

72. Guiñazú L. B., Andrés J. A., MFDel P., Pistorio M., Rosas S. B. Response of alfalfa (*Medicago sativa* L.) to single and mixed inoculation with phosphate-solubilizing bacteria and *Sinorhizobium meliloti* // *Biology and Fertility of Soils*. 2009. Vol. 46(2). P. 185–190. DOI: 10.1007/s00374-009-0408-5.
73. Afzal A., Bano A. Rhizobium and phosphate solubilizing bacteria improve the yield and phosphorus uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) // *International Journal of Agriculture and Biology*. 2008. Vol. 10(1). P. 85–88.
74. Yousefi A., Khavazi K., Moezi A., Rejali F., Nadian H. Phosphate solubilizing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi impacts on inorganic phosphorus fractions and wheat growth // *World Applied Sciences Journal*. 2011. Vol. 15. P. 1310–1318.
75. Iutinskaya G. A. Biotechnological potential of soil bacteria – the basis of microbial preparations for crop production // *Microbial biotechnologies: fundamental and applied aspects. Collection of scientific papers*. 2013. Vol. 5. P. 235–244.
76. Iutynska G. O., Bilyavska L. O., Titova L. V., Leonova N. O., Yamborko N. A., Petruk T. V., Vozniuk S. V. Microbial bioformulations for plant growing. Methodical recommendations. Kyiv: Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of NAS of Ukraine, 2017. 83 p.
77. Bioregulation of microbial and plant systems // Ed. by Iutinskaya G.A., Ponomarenko S. P. Kiev: Nichlava, 2010. 464 p.
78. Patent of Ukraine No. 101388. Complex microbial preparation Ekovital for legumes cultivation // Authors: Titova L. V., Leonova N. O., Brovko I. S., Iutynska G. O. Publ. 25.03.2013. Bul. No. 6.
79. Vozniuk S. V., Tytova L. V., Lyaska S. I., Iutynska G. O. Influence of fungicides complex inoculum Ekovital on rhizosphere microbiocenosis, diseases resistance and soybeen productivity // *Mikrobiolohichni Zhurnal (Microbiological Journal)*. 2015. No. 77(4). P. 8–14.
80. Patent of Ukraine No 105276. Complex bacterial preparation Ecophosphorin for processing of cultivated plants // Authors: Titova L. V., Iutynska G. O., Brovko I. S. Publ. 25.04.2014. Bul. No. 8.
81. Tokmakova L.N. Strains of *Bacillus polymyxa* and *Achromobacter album* - the basis for the creation of bacterial preparations // *Mikrobiolohichni Zhurnal (Microbiological Journal)*. 1997. Vol. 59. No. 4. P. 131–138.
82. Tokmakova L. N. Microbial preparations to increase phosphate nutrition, crop productivity and saccharinity of sugar beet root // *Agricultural microbiology*. 2006. No. 4. P. 126–136.
83. Blyznyuk N. M., Tokmakova L. M., Lepekha O. P. Influence of Agrobacterin on root rots and fusarium wilt of plants of yellow lupine, their yield and grain quality // *Phosphorus and potassium in agriculture. Problems of microbiological mobilization. Collection of scientific works*. 2004. P. 5–9.
84. Tokmakova L. M., Trepach A. O., Lepekha O. G. Influence of phosphate-mobilizing bacteria on winter wheat phosphorus nutrition // *Agrochemistry and soil science. Special issue for the VIII Congress of UTGA*. 2010. Book. 3. P. 339–340.
85. Tokmakova L. M. Laboratory of biological phosphorus. Research results // *Agricultural microbiology: achievements and prospects. Collection of scientific works (dedicated to the 50th anniversary of the founding of Institute of Agricultural Microbiology of NAAS)*. 2011. P. 31–35.
86. Patent RF No. 2676926 “Phosphate-mobilizing strains of soil bacteria *Lelliottia nimipressuralis* CCM 32-3 and biopreparation on its basis for the optimization of mineral nutrition of plants, stimulates their growth and increase yields application” // Authors: Chaikovskaya L. A., Melnichuk T. N., Kameneva I. A., Baranskaya M. I., Ovsienko O. L. 2019. Bul. No. 2. 12 p.
87. Sukhovitskaya L. A. Phosphate-mobilizing microorganisms and biophosphorus in agricultural practice in Belarus // *Phosphorus and potassium in agriculture. Problems of microbiological mobilization. Collection of scientific works*. 2004. P. 135–140.
88. Aleschenkova Z. Microbial fertilizers stimulating plant growth and development // *Nauka i Innovatsii*. 2015. No. 8(150). P. 66–67.

UDC 579.64; 631.461; 633.1

Chaikovskaya L. A., Ovsienko O. L.

PHOSPHATE-MOBILIZING MICROORGANISMS:

1. BIODIVERSITY, INFLUENCE ON PLANTS MINERAL NUTRITION AND PRODUCTIVITY

Summary. Phosphorus is an essential plant nutrient involved in plants' growth and development, accelerated formation of reproductive organs and other important factors for obtaining high and stable crop yields and, therefore, high-quality products. Easily absorbed phosphorus compounds obtained from soil or fertilizers are the most valuable for plants.

One of the promising directions for improving the phosphorus nutrition of agricultural crops is biological phosphate mobilization that is carried out by soil microorganisms – bacteria and filamentous fungi (micromycetes). They contribute to the conversion of poorly soluble phosphorus compounds into forms accessible to higher plants. The effect of microorganisms on plants in terms of improving their mineral nutrition, in particular phosphorus, was reviewed in this article. We analysed domestic and foreign literature sources (over the last 15 years) focused on the biodiversity of soil phosphate-mobilizing microorganisms and their influence on converting insoluble phosphate to soluble forms. The features of the mechanisms of biotransformation of organic and mineral phosphates by soil microorganisms and the main criteria for screening effective isolates able to convert poorly soluble phosphorus compounds into forms available for plants were described in detail. This review also demonstrates that several microorganisms belonging to different taxonomic groups (bacteria and micromycetes) are recognized as powerful phosphate solubilizers or bioconverters of poorly soluble phosphorus compounds into water-soluble forms. We also surveyed scientific works, in which the practical application of effective strains of microorganisms that transform unavailable phosphorus compounds into available for plants was studied; and those, in which the role of microorganisms in increasing the availability of phosphorus for agricultural plants and their productivity improvement was demonstrated. A comprehensive description of microbial preparations “Agrofil”, “Biovays”, “Ekophosphorin”, “Ekovital”, “Biophosphorin”, “Albobacterin”, “Polymiksobacterin”, “Agrobacterin”, “Phosphostim”, “Fitostimophos”, “Agromik”, “Baktopin” based on phosphate-mobilizing microorganisms, developed and used in various countries to optimize mineral nutrition of cultivated plants, is given.

Keywords: *biological phosphate-mobilization, bacteria, micromycetes, solubilization, mineralization, plants productivity, microbial preparations.*

Чайковская Людмила Александровна, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории растительно-микробного взаимодействия ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295053, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: ludachaika@mail.ru.

Овсиенко Ольга Леонидовна, старший научный сотрудник лаборатории растительно-микробного взаимодействия ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295053, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: olovsien@mail.ru.

Chaikovskaya Ludmila Aleksandrovna, Dr. Sc. (Agr.), senior researcher, chief researcher, Laboratory of plant-microbe interaction, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295053, Russia; e-mail: ludachaika@mail.ru.

Ovsienko Olga Leonidovna, senior researcher, Laboratory of plant-microbe interaction, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295053, Russia; e-mail: ludachaika@mail.ru.

Дата поступления в редакцию – 28.09.2021.

Дата принятия к печати – 20.10.2021.