



УДК: 631.8:631.46:635.64

ВЛИЯНИЕ БИОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ НА РОСТ, РАЗВИТИЕ И УРОЖАЙНОСТЬ ПОМИДОРА (*GOSSYPIUM HIRSUTUM* L.)

Юлдошев Шокир Уринович 
E-mail: yuldoshevshokir140@gmail.com.

Асатова Саодат Саидовна 
E-mail: saodatasatova5555@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования влияния биомодифицированного фосфорного удобрения «БМ-АММАФОС», обогащённого фосфатмобилизирующим штаммом *Bacillus subtilis* BS-26, на агрохимические свойства почвы, ферментативную активность и продуктивность томата (*Solanum lycopersicum* L., сорт «Юсуповский») в условиях карбонатных серозёмов Ташкентской области.

Установлено, что применение «БМ-АММАФОС» способствует значительному повышению биологической доступности фосфора за счёт пролонгированного сохранения подвижных форм P_2O_5 в почве. Через 30 суток после внесения содержание доступного фосфора в вариантах с «БМ-АММАФОС» достигало 90–98 мг/кг, что более чем в 2 раза превышало показатели традиционного «АММАФОС» (36–38 мг/кг). Одновременно наблюдалось существенное увеличение активности почвенных фосфатаз (до 1,5–1,7 раз), что свидетельствует об активации микробиологических процессов и усилении трансформации труднорастворимых форм фосфора.

На фоне улучшения фосфорного питания отмечено достоверное стимулирование роста и развития растений томата: увеличение высоты растений, количества листьев, кистей, цветков и завязей. Наиболее выраженный эффект получен при внесении «БМ-АММАФОС» в дозе 50 кг/га, где урожайность достигала 39,4 ц/га, что на 49,2 % выше по сравнению с контролем.

Показано, что биомодификация минеральных фосфорных удобрений является эффективным агротехнологическим приёмом, направленным на повышение коэффициента использования фосфора, снижение его фиксации в почве и увеличение продуктивности сельскохозяйственных культур. Полученные результаты подтверждают перспективность применения «БМ-



AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

АММАФОС» в системах устойчивого земледелия на почвах с низкой подвижностью фосфора.

Ключевые слова: биомодифицированные удобрения, аммофос, *Bacillus subtilis*, фосфатмобилизирующие микроорганизмы, хлопчатник, урожайность, серозёмные почвы.

Annotatsiya. Ushbu maqolada karbonatli bo'z tuproq sharoitida (Toshkent viloyati) pomidor (*Solanum lycopersicum* L., «Yusupovskiy» navi) o'simligi misolida fosfatmobillashtiruvchi *Bacillus subtilis* BS-26 shtammi bilan biomodifikatsiya qilingan «BM-AMMAFOS» fosforli o'g'itining tuproqning agrokimyoviy xossalari, fermentativ faolligi va o'simlik hosildorligiga ta'siri bo'yicha kompleks tadqiqot natijalari keltirilgan.

Aniqlanishicha, «BM-AMMAFOS» qo'llanilishi tuproqda fosforning biologik faol shakllari miqdorini uzoq muddat saqlanishi hisobidan fosforning mavjudligini sezilarli oshiradi. 30 kundan so'ng o'tkazilgan o'lchovlarda erishilgan fosfor miqdori 90–98 mg/kg ni tashkil etib, bu oddiy «AMMAFOS» variantiga (36–38 mg/kg) nisbatan 2 barobardan yuqori ko'rsatkichni namoyon qildi. Shu bilan birga tuproq fosfatazalarining faolligi 1,5–1,7 barobar oshgani kuzatildi, bu esa mikrobiologik jarayonlarning faollashganini va fosforning qiyin eriydigan shakllarining transformatsiyasi kuchayganini ko'rsatadi.

Fosforli ozuqa rejimi yaxshilanishi natijasida pomidor o'simligining o'sishi va rivojlanishi sezilarli darajada kuchaydi: o'simlik balandligi, barglar soni, shingillar, gullar va tugunlar miqdori oshdi. Eng yuqori samara «BM-AMMAFOS» 50 kg/ga me'yorda qo'llanilganda kuzatilib, hosildorlik 39,4 s/ga ni tashkil etdi va nazoratga nisbatan 49,2 % ga yuqori bo'ldi.

Olingan natijalar mineral fosforli o'g'itlarni biomodifikatsiya qilish fosfordan foydalanish koeffitsiyentini oshirish, uning tuproqda fiksatsiyasini kamaytirish va qishloq xo'jaligi ekinlari mahsuldorligini oshirishga qaratilgan samarali agrotexnologik usul ekanligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: biomodifikatsiya qilingan o'g'itlar, ammosfos, *Bacillus subtilis*, fosfatmobillashtiruvchi mikroorganizmlar, pomidor, hosildorlik, bo'z tuproqlar.

Abstract. This article presents the results of a comprehensive study on the effects of the bio-modified phosphorus fertilizer “BM-AMMOPHOS”, enriched with the phosphate-solubilizing strain *Bacillus subtilis* BS-26, on soil agrochemical properties, enzymatic activity, and tomato (*Solanum lycopersicum* L., cultivar “Yusupovsky”) productivity under calcareous serozem soils of the Tashkent region.

It was established that the application of “BM-AMMOPHOS” significantly enhances phosphorus bioavailability due to the prolonged preservation of mobile P_2O_5 forms in the soil. After 30 days, available phosphorus content in the “BM-AMMOPHOS” treatment reached 90–98 mg/kg, which is more than twice as high as in the conventional “AMMOPHOS” treatment (36–38 mg/kg). At the same time, a substantial increase in soil phosphatase activity (by 1.5–1.7 times) was observed,



AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

indicating the activation of microbial processes and enhanced transformation of poorly soluble phosphorus compounds.

Improved phosphorus nutrition resulted in a marked stimulation of tomato growth and development, including increases in plant height, leaf number, clusters, flowers, and fruit set. The most pronounced effect was observed at an application rate of 50 kg/ha of “BM-AMMOPHOS”, where yield reached 39.4 c/ha, which is 49.2% higher compared to the control.

The results demonstrate that bio-modification of mineral phosphorus fertilizers is an effective agronomic approach to increase phosphorus use efficiency, reduce its fixation in soil, and enhance crop productivity. These findings confirm the potential of “BM-AMMOPHOS” for sustainable agriculture in soils with low phosphorus mobility.

Keywords: bio-modified fertilizers, ammophos, *Bacillus subtilis*, phosphate-solubilizing microorganisms, tomato, yield, serozem soils.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях интенсификации сельского хозяйства приоритетными направлениями аграрной науки остаются повышение продуктивности сельскохозяйственных культур, восстановление плодородия почв и снижение негативного воздействия на окружающую среду. Существенная роль в решении этих задач принадлежит рационализации минерального питания растений, среди элементов которого фосфор занимает ключевое место как один из лимитирующих факторов урожайности, особенно в условиях карбонатных и солонцеватых почв, широко распространённых в странах Средней Азии [1,2].

Несмотря на широкое применение традиционных фосфорных удобрений, их агрономическая эффективность остаётся ограниченной. По данным многочисленных исследований, коэффициент использования фосфора растениями составляет лишь 8–25% от внесённого количества, тогда как основная его часть быстро переходит в труднорастворимые соединения вследствие процессов адсорбции и химической фиксации с участием почвенных катионов [3,4]. Подобные потери не только снижают экономическую эффективность применения удобрений, но и приводят к экологическим последствиям, включая накопление избыточного фосфора в почвах, эвтрофикацию водных объектов, а также усиление процессов засоления и деградации агроэкосистем [5,6].

В этой связи особый интерес представляет разработка и внедрение биомодифицированных фосфорных удобрений (БМФУ), сочетающих минеральные компоненты с функционально активными микроорганизмами. К числу последних относятся фосфатмобилизующие микроорганизмы (ФММ), способные трансформировать нерастворимые формы фосфора в доступные



AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

для растений соединения за счёт синтеза органических кислот, ферментов (в частности, фосфатаз) и других биологически активных метаболитов [7,8,9,10].

Мировая практика показывает, что подобные биопрепараты находят всё более широкое применение в системах органического и ресурсосберегающего земледелия, выступая в качестве эффективной агроэкологической альтернативы традиционным минеральным удобрениям [11,12]. Перспективным направлением является иммобилизация микробиологических консорциумов на поверхности гранул фосфорсодержащих носителей, что позволяет формировать биофункциональные структуры с пролонгированным действием. Такие системы не только обеспечивают постепенное высвобождение питательных элементов, но и способствуют подавлению фитопатогенной микрофлоры, а также стимулируют развитие корневой системы растений [13,14].

Биомодифицированные фосфорные удобрения, обогащённые фосфатмобилизующими бактериями и органическими активаторами, рассматриваются как перспективный инструмент повышения коэффициента использования фосфора и общей агроэкологической эффективности минерального питания. Их применение особенно актуально в условиях орошаемого земледелия Узбекистана, где преобладают карбонатные серозёмы с щелочной реакцией среды и низкой подвижностью фосфора [15,16].

Томат (*Solanum lycopersicum*), являющийся одной из ключевых сельскохозяйственных культур региона, предъявляет повышенные требования к фосфорному питанию, особенно в критические фазы органогенеза, такие как цветения и формирование плодов. В указанных почвенно-климатических условиях внесённый фосфор (в форме P_2O_5) подвержен быстрой фиксации, что существенно ограничивает его доступность для растений и, соответственно, снижает эффективность удобрений [16,17].

В связи с этим целью настоящего исследования является оценка влияния биомодифицированных фосфорных удобрений на ростовые, физиолого-биохимические и продукционные показатели растений томата. Полученные результаты могут служить научной основой для разработки устойчивых агротехнологий, ориентированных на повышение эффективности использования фосфора в условиях аридных и деградированных почв Средней Азии.

Целью настоящего исследования являлась всесторонняя оценка эффективности биомодифицированного аммофоса («БМ-АММАФОС»), разработанного в Институте химии растительных веществ Академии наук Республики Узбекистан. В качестве исходной минеральной основы использовалось отечественное фосфорсодержащее удобрение аммофос («АММАФОС»), производимое АО «Amtofос-Махам», являющимся одним из ведущих предприятий по выпуску комплексных азотно-фосфорных удобрений в Центральноазиатском регионе. Биомодификация осуществлялась



AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

с использованием фосфатмобилизирующего штамма микроорганизма *Bacillus subtilis* BS-26.

В рамках поставленной цели предусматривалось решение ряда взаимосвязанных задач, включающих изучение трансформации подвижных форм фосфора (P_2O_5) в почвенной системе в условиях лабораторного моделирования, а также оценку влияния «БМ-АММАФОС» на ростовые, физиолого-биохимические и продукционные показатели растений томата (*Solanum lycopersicum* L., сорт «Юсуповский»).

Особое внимание уделялось сравнительному анализу эффективности биомодифицированного удобрения и традиционного аммофоса при их внесении в типичные серозёмные почвы Ташкентской области. Это позволило оценить не только агробиологическую результативность разработанного препарата, но и его потенциальное агроэкологическое значение в условиях орошаемого земледелия.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие исследовательские задачи:

1. Провести лабораторные эксперименты по определению содержания подвижных форм фосфора (P_2O_5) в почвах опытных участков с использованием стандартизированных методик.
2. Изучить влияние биомодифицированного удобрения на рост, развитие и формирование урожайности томата, сорта «Юсуповский» в условиях полевого опыта на серозёмных почвах.
3. Сравнить агробиологическую и агроэкологическую эффективность традиционного аммофоса «АММАФОС» и «БМ-АММАФОС», включая показатели урожайности и качества продукции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Объекты исследования

В качестве объектов исследования использовались растения томата сорта «Юсуповский», фосфорные минеральные удобрения — традиционный аммофос («АММАФОС»-моноаммонийфосфат), а также его биомодифицированная форма («БМ-АММАФОС»). Исходное удобрение было произведено АО «Amtofос-Maxam» с использованием фосфоритного сырья Кызылкумского месторождения.

Биомодифицированный препарат «БМ-АММАФОС» получали путём обработки гранул аммофоса с применением фосфатмобилизирующего штамма *Bacillus subtilis* BS-26, обладающего способностью к мобилизации труднорастворимых форм фосфора.

Дополнительно объектом исследования являлись почвы опытных участков, представленные типичными серозёмами, характерными для условий орошаемого земледелия Ташкентской области.



2.2. Характеристика удобрений

В экспериментальных исследованиях использовался аммофос («АММАФОС», $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) марки 46:11, произведённый АО «Аmmofos-Махам» на основе фосфоритов Кызылкумского месторождения. Массовая доля усвояемых форм фосфора в пересчёте на P_2O_5 составляет $46 \pm 1,0\%$, при этом фактический диапазон содержания усвояемых фосфатов варьирует в пределах 33,0–43,0%, что обусловлено особенностями исходного минерального сырья и технологического процесса.

Биомодифицированный вариант удобрения («БМ-АММАФОС») представляет собой гранулированный аммофос той же марки (46:11), модифицированный путём инокуляции штаммом фосфатмобилизирующих микроорганизмов *Bacillus subtilis* BS-26. В результате биомодификации формируется функционально активная система, обеспечивающая постепенную мобилизацию фосфора в почвенной среде и повышение его доступности для растений.

Следует отметить, что применение подобных биомодифицированных форм удобрений позволяет не только увеличить коэффициент использования фосфора, но и активизировать микробиологическую активность ризосферы, что в целом способствует улучшению агрохимических свойств почвы.

2.3. Характеристика культуры

Объектом биологических исследований служил сорт томата «Юсуповский», широко распространённый в условиях Узбекистана и адаптированный к континентальному климату региона. Данный сорт был выведен около 50 лет назад на опытных участках Научно-исследовательского института овощебахчевых культур и отличается высокими вкусовыми и агрономическими характеристиками.

Растения характеризуются такими хозяйственно-ценными признаками как, мощными, вегетативно развитым стеблем, достигающие высоты 150–170 см с продолжительностью полного цикла развития 120–130 суток. Характер плодоношения — растянутый, с началом в первой декаде августа и продолжением до середины сентября с продуктивностью при благоприятных агротехнических условиях 10–12 кг/м². Сорт обладает повышенной устойчивостью к температурным колебаниям, что обеспечивает стабильное формирование урожая в условиях переменчивого климата.

С физиологической точки зрения томат относится к культурам с высоким уровнем потребления фосфора, особенно в фазах активного роста, цветения и формирования плодов, что делает его удобным модельным объектом для оценки эффективности фосфорсодержащих удобрений.

2.4. Почвенные условия проведения исследований

Полевые и лабораторные исследования проводились на типичных серозёмных почвах, широко распространённых в условиях орошаемого земледелия Ташкентской области. Данные почвы сформированы в аридном



AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

климате и характеризуются щелочной реакцией среды, высоким содержанием карбонатов кальция и низкой обеспеченностью подвижными формами фосфора, что существенно ограничивает эффективность фосфорного питания растений.

Почвенные образцы для анализа отбирались из пахотного горизонта (0–30 см) с последующей подготовкой в соответствии с общепринятыми агрохимическими методиками. Определение основных физико-химических и агрохимических показателей проводилось с использованием стандартных методов (по Чирикову, Мачигину и др.). Агрохимическая характеристика исследуемой почвы представлена в таблице 1.

Таблица 1

Агрохимические свойства почвы опытного участка (0–30 см)

Показатель	Единица измерения	Значение
Гранулометрический состав	—	среднесуглинистый
pH (водная вытяжка)	ед. pH	7,8–8,4
Содержание гумуса	%	0,8–1,2
Общий азот (N)	%	0,06–0,09
Подвижный фосфор (P ₂ O ₅ , по Чирикову)	мг/кг	12–18
Обменный калий (K ₂ O)	мг/кг	180–240
Карбонаты (CaCO ₃)	%	12
Суммарная поглотительная способность	мг-экв/100 г	9–12

Почвы опытных участков представлены типичными орошаемыми сероземами с суглинистой текстурой, высоким содержанием карбонатов (до 12%) и слабощелочной реакцией среды (pH 7.8–8.4). Гумусовый горизонт характеризуется средней мощностью (50–80 см) и содержанием гумуса 0,8–1,2%, а суммарная поглотительная способность составляет 9–12 мг-экв/100 г.

Полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемая почва относится к категории с низкой обеспеченностью подвижным фосфором (менее 20 мг/кг), что обусловлено высокой степенью его фиксации карбонатами кальция и магния. Щелочная реакция среды (pH > 7,5) дополнительно ограничивает доступность фосфат-ионов для растений за счёт образования труднорастворимых соединений типа Ca₃(PO₄)₂.

Низкое содержание гумуса (менее 1,2%) указывает на недостаточную биологическую активность почвы и слабую буферную способность, что также снижает эффективность традиционных минеральных удобрений. В этих условиях особую актуальность приобретает применение биомодифицированных форм удобрений, способных активизировать микробиологические процессы и повышать мобилизацию труднорастворимых фосфатов.



AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

Следует отметить, что при орошении таких почв возможно усиление процессов вторичного засоления и уплотнения, что дополнительно осложняет условия питания растений. В связи с этим использование биомодифицированных удобрений рассматривается не только как способ повышения доступности элементов питания, но и как элемент экологически устойчивых агротехнологий.

Таким образом, выбранные почвенные условия являются репрезентативными для значительной части сельскохозяйственных угодий Узбекистана и позволяют объективно оценить эффективность «БМ-АММАФОС» в реальных агроэкологических условиях.

2.5. Схема опыта и экспериментальные варианты

В рамках полевых исследований было изучено влияние различных форм фосфорных удобрений на продуктивность сельскохозяйственной культуры. В эксперименте использовались два типа удобрений:

- традиционный аммофос («АММАФОС», 46:11), произведённый АО «Аммофос-Махам», в стандартной агрономической норме внесения — 80 кг/га по действующему веществу (P_2O_5);
- биомодифицированный аммофос (БМ-«АММАФОС»), полученный с использованием штамма *Bacillus subtilis* BS-26, в пониженных дозах — 50 и 40 кг/га.

Выбор доз биомодифицированного удобрения был обусловлен предположением о повышенной эффективности «БМ-АММАФОС» за счёт микробиологической активации фосфора, что потенциально позволяет снизить нормы внесения без потери продуктивности.

Внесение удобрений осуществлялось механизированным способом в фазе формирования 5–6 настоящих листьев. Удобрения заделывались в междурядья на глубину 12 см с использованием культиватора ДВ-1440.

Схема размещения вариантов была организована по принципу рандомизированного блочного опыта с трёхкратной повторностью. Площадь одной делянки составляла 100 м².

Схема полевого опыта:

Повторение I	Повторение II	Повторение III
«АММАФОС» ₈₀	«БМ-АММАФОС» ₄₀	«БМ-АММАФОС» ₅₀
«БМ-АММАФОС» ₄₀	«БМ-АММАФОС» ₅₀	«АММАФОС» ₈₀
«БМ-АММАФОС» ₅₀	«АММАФОС» ₈₀	«БМ-АММАФОС» ₄₀

Размещение вариантов в пределах делянок осуществлялось методом случайной выборки, что обеспечивало минимизацию влияния почвенной неоднородности и повышение достоверности результатов. Закладка и проведение полевого опыта выполнялись в соответствии с общепринятыми методическими рекомендациями, включая подходы, разработанные Б.А. Доспеховым [21].





2.6. Фенологические наблюдения и учёт урожайности

Оценка роста, развития и продуктивности растений проводилась с использованием стандартных методик полевых исследований [22]. В ходе вегетационного периода фиксировались основные фенологические фазы, а также определялись морфометрические показатели растений, включая:

- ✓ высоту растений;
- ✓ количество плодовых образований;
- ✓ интенсивность формирования генеративных органов;
- ✓ степень развития надземной биомассы.

Учёт урожайности осуществлялся методом выборочного сбора продукции с учётных делянок с последующим пересчётом на единицу площади. Полученные данные использовались для оценки продукционной эффективности различных вариантов удобрений.

2.7. Статистическая обработка данных

Обработка экспериментальных данных проводилась с применением методов дисперсионного анализа в соответствии с методикой Б.А. Доспехова [21]. Оценка достоверности различий между вариантами осуществлялась с использованием критерия наименьшей значимой разности (НСР) при уровне значимости $p < 0,05$ (Dospikhov, 1985).

2.3. Методология исследований

Методика определения подвижного фосфора в почве

Содержание подвижных форм фосфора (P_2O_5) в почве определяли методом Олсена, адаптированным к условиям карбонатных почв [18], который является международным стандартом для слабощелочных и нейтральных почв (ISO 11263:2021).

Метод основан на экстракции фосфатов раствором 0,5 М $NaHCO_3$ (рН 8,5), обеспечивающим переход доступных форм фосфора в растворенное состояние с последующим фотометрическим определением.

Отбор почвенных проб осуществлялся из зоны внесения удобрений (глубина 0–15 см). Образцы предварительно высушивались до воздушно-сухого состояния и просеивались через сито 2 мм.

Навеска почвы (5 г) помещалась в колбу объёмом 250 мл, добавлялось 100 мл раствора $NaHCO_3$ и 1–3 г активированного угля для удаления органических примесей. Смесь встряхивалась на шейкере при 25 ± 1 °С в течение 30 минут, после чего фильтровалась через бумажный фильтр.

Аликвота фильтрата (5–40 мл) переносилась в мерную колбу (100 мл), проводилась нейтрализация 10%-ным раствором HCl по индикатору динитрофенола. Далее добавлялись молибдатно-ванадатные реагенты, формирующие окрашенный комплекс, интенсивность которого пропорциональна концентрации фосфатов.



AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

Оптическая плотность измерялась при длине волны 430 нм с использованием спектрофотометра [19].

Определения проводились в динамике: до внесения удобрений, а также через 15 минут, 1 час, 3 дня, 10 и 30 дней после внесения, что позволило оценить кинетику трансформации подвижного фосфора в почвенной системе.

Определение ферментативной активности почвы

Фосфатазная активность почвы определялась в образцах, отобранных из той же глубины, что и для анализа подвижного фосфора (0–15 см), с целью сопоставимости данных.

Навеска воздушно-сухой почвы (1 г) помещалась в колбу Эрленмейера, добавлялись 4 мл универсального буфера (рН 6,5), 0,25 мл толуола и 1 мл 0,115 М раствора п-нитрофенилфосфата натрия (ПНФФ). Смесь инкубировалась 5 минут при перемешивании, после чего колбы выдерживались в термостате при 37 °С в течение 1 часа.

Реакция останавливалась добавлением 1 мл 0,5 М NaOH с последующим перемешиванием и фильтрацией через беззольный фильтр в мерную колбу (50 мл). Образующийся п-нитрофенол придавал раствору жёлтую окраску.

Интенсивность окраски измерялась фотоколориметрически при 400–420 нм с использованием синего светофильтра. Концентрация п-нитрофенола определялась по калибровочной кривой стандартных растворов.

Фосфатазная активность выражалась в мг п-нитрофенола·кг⁻¹ почвы·ч⁻¹ [20].

Определения проводились в динамике аналогично схеме анализа подвижного фосфора (0, 15 мин, 1 ч, 3, 10 и 30 суток после внесения удобрений), что позволило оценить изменение биологической активности почвы во времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика подвижных форм фосфора в почве

Результаты исследований показывают, что внесение как традиционного «АММАФОС»₈₀, так и биомодифицированных удобрений «БМ-АММАФОС»₄₀ и «БМ-АММАФОС»₅₀ приводит к выраженной динамике содержания подвижных форм фосфора (P₂O₅) в почве в течение 30 суток после внесения.

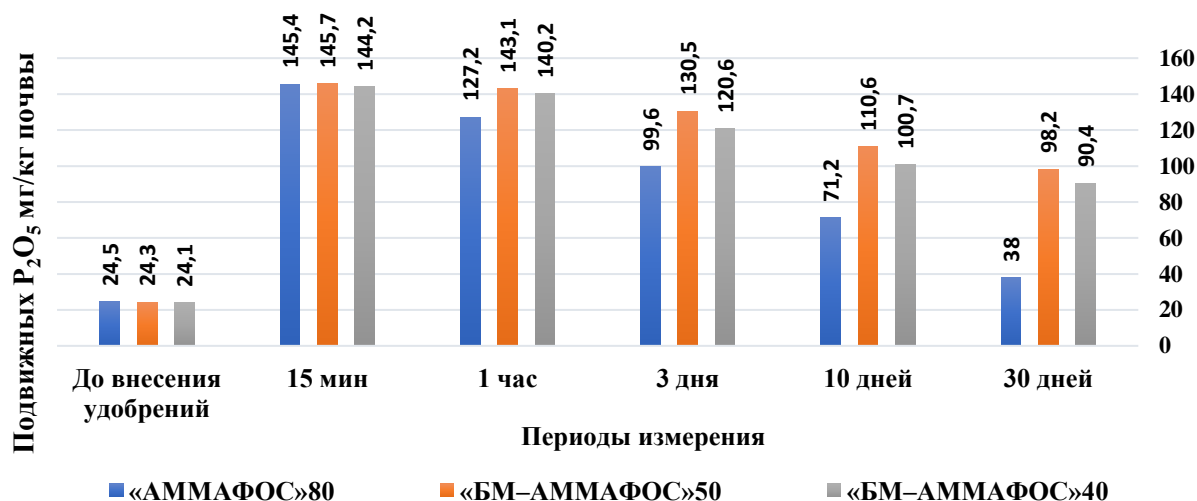
До внесения удобрений уровень подвижного фосфора во всех вариантах был практически одинаковым и составлял 24,1–24,5 мг/кг почвы, что свидетельствует о однородности исходных почвенных условий.

Через 15 минут после внесения наблюдается резкое увеличение содержания подвижного фосфора во всех вариантах опыта. Максимальные значения зафиксированы в варианте «БМ-АММАФОС»₅₀ (145,7 мг/кг), что несколько превышает показатели традиционного «АММАФОС»₇₀ (145,4 мг/кг) и «БМ-АММАФОС»₄₀ (144,2 мг/кг), указывая на высокую начальную мобилизацию фосфатов.





AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI



Рисунок–1. Кинетика изменений подвижных форм (P_2O_5) традиционных и биомодифицированных удобрений в почве.

В дальнейшем отмечается постепенное снижение концентрации подвижного P_2O_5 во всех вариантах, однако интенсивность снижения существенно различается. Так, на 3-и сутки уровень фосфора составил 99,6 мг/кг («АММАФОС»₈₀), 130,5 мг/кг («БМ-АММАФОС»₅₀) и 120,6 мг/кг («БМ-АММАФОС»₄₀), что демонстрирует более устойчивое сохранение доступного фосфора в вариантах с биомодификацией.

На 10-е сутки тенденция к снижению сохраняется, однако в вариантах «БМ-АММАФОС» отмечается более высокая остаточная концентрация подвижного фосфора (100,7–110,6 мг/кг) по сравнению с традиционным удобрением (71,2 мг/кг).

К 30-м суткам наблюдается значительное снижение содержания P_2O_5 во всех вариантах, при этом минимальные значения зафиксированы в контроле «АММАФОС»₈₀ (38 мг/кг), тогда как в вариантах «БМ-АММАФОС»₄₀ и «БМ-АММАФОС»₅₀ сохраняются более высокие уровни (90,4 и 98,2 мг/кг соответственно).

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о том, что биомодифицированные удобрения обеспечивают более стабильное и пролонгированное содержание подвижного фосфора в почве по сравнению с традиционным аммофосом, что, вероятно, связано с активностью фосфатмобилизирующих микроорганизмов (*Bacillus subtilis* BS-26) и их способностью замедлять фиксацию фосфора в труднодоступные формы.

Таким образом, биомодифицированный аммофос («БМ-АММАФОС») характеризуется выраженным пролонгированным действием, замедляя процессы фиксации фосфора и его переход в труднорастворимые, малодоступные для растений формы. Полученные результаты согласуются с данными других исследователей, согласно которым применение



фосфатмобилизирующих микроорганизмов способствует снижению скорости иммобилизации растворимых форм фосфора и обеспечивает поддержание их доступности в почве на протяжении всего вегетационного периода [23–25].

Механизмы сохранения подвижного фосфора

Высокая эффективность «БМ–АММАФОС» обусловлена метаболической активностью *Bacillus subtilis* BS-26. Этот штамм продуцирует органические кислоты (лимонную, щавелевую, яблочную, уксусную), которые растворяют малорастворимые Са- и Fe-фосфаты, а также связывают катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} и Al^{3+} в хелатные комплексы, препятствуя фиксации фосфора [26–28]. Дополнительно ферментативная активность (кислые и щелочные фосфатазы) способствует минерализации органических остатков, пополняя пул доступного P_2O_5 [26].

Особенно важен данный механизм для карбонатных почв Центральной Азии, где высокая концентрация CaCO_3 значительно ограничивает эффективность традиционных фосфорных удобрений [25]. Таким образом, использование микробиологически модифицированных форм аммофоса может рассматриваться как стратегический путь повышения фосфорной эффективности в условиях орошаемых серозёмов Узбекистана.

Исследование ферментативной активности почвы.

Полученные результаты свидетельствуют о принципиально различном влиянии традиционного аммофоса («АММАФОС») и биомодифицированного аммофоса («БМ–АММАФОС», - модифицированным штаммом *Bacillus subtilis* BS-26) на динамику фосфатазной активности в серозёмных почвах Ташкентской области (Рис.2).

Результаты исследований показывают, что внесение фосфорных удобрений оказывает выраженное влияние на ферментативную активность почвы, при этом характер изменений существенно зависит от типа применяемого удобрения.

Исходный уровень активности фосфатаз до внесения удобрений был практически одинаковым во всех вариантах и составлял $240,3\text{--}240,6$ мг р-нитрофенола·кг⁻¹·ч⁻¹, что подтверждает однородность исходного биохимического состояния почвы.

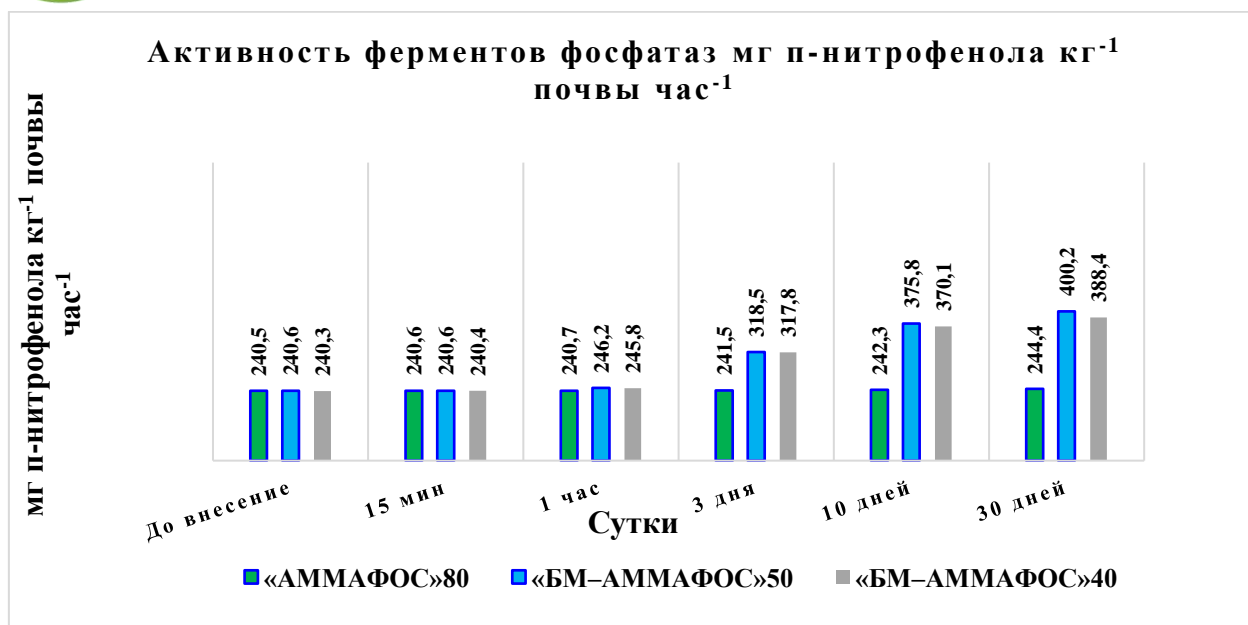


Рисунок 2. Динамика активности ферментов фосфатаз в почве (мг р-нитрофенола·кг⁻¹·ч⁻¹) под влиянием «АММАФОС» и «БМ-АММАФОС»

В варианте с традиционным «АММАФОС»₈₀ в течение всего периода наблюдений отмечалось лишь незначительное увеличение активности фермента — с 240,5 до 244,4 мг р-нитрофенола·кг⁻¹·ч⁻¹ к 30-м суткам, что указывает на слабое влияние минерального удобрения на биологические процессы мобилизации фосфора.

В отличие от этого, применение биомодифицированных удобрений сопровождалось выраженной активацией фосфатазной активности. Уже через 1 час после внесения в вариантах «БМ-АММАФОС» наблюдалось увеличение активности до 245,8–246,2 мг р-нитрофенола·кг⁻¹·ч⁻¹. Наиболее интенсивный рост фиксировался на 3-и сутки, когда значения достигали 317,8–318,5 мг р-нитрофенола·кг⁻¹·ч⁻¹.

Максимальные показатели ферментативной активности отмечены на 10-е и 30-е сутки: в варианте «БМ-АММАФОС»₅₀ — 375,8 и 400,2 мг р-нитрофенола·кг⁻¹·ч⁻¹ соответственно, а в варианте «БМ-АММАФОС»₄₀ — 370,1 и 388,4 мг р-нитрофенола·кг⁻¹·ч⁻¹. Это свидетельствует о выраженном пролонгированном эффекте биомодифицированных удобрений.

Таким образом, установлено, что биомодификация аммофоса приводит к существенной активации ферментативной системы почвы и увеличению активности фосфатаз в 1,5–1,7 раза по сравнению с исходным уровнем, тогда как традиционное удобрение не оказывает значимого стимулирующего эффекта.

Вероятно, наблюдаемый эффект обусловлен деятельностью фосфатмобилизирующих микроорганизмов (*Bacillus subtilis* BS-26), входящих в состав «БМ-АММАФОС», которые продуцируют ферменты и органические кислоты, способствующие мобилизации труднорастворимых форм фосфора.



AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

Подобные закономерности согласуются с результатами, полученными рядом исследователей. Так, в почвах Узбекистана и Казахстана применение фосфатмобилизирующих микроорганизмов родов *Bacillus* и *Pseudomonas* сопровождалось увеличением активности фосфатаз на 30–60 % по сравнению с вариантами, где использовались только минеральные удобрения [17,31,32]. Аналогичные результаты получены в агроэкосистемах Индии и Китая, где применение биоудобрений на основе *Bacillus subtilis* способствовало повышению активности как кислых, так и щелочных фосфатаз, а также улучшению фосфорного питания растений хлопчатника и кукурузы [7,20].

Фосфатазы, являясь специализированными экзоферментами микробного происхождения, играют ключевую роль в трансформации органического фосфора в почве. Они катализируют гидролиз фосфорсодержащих соединений — прежде всего фосфомоноэфиров и фосфоангидридов — обеспечивая минерализацию органических форм фосфора и их переход в доступные для растений соединения [26,29]. При этом фосфатазы участвуют не только в разложении органического вещества, но и косвенно способствуют повышению доступности минерального фосфора за счёт активизации биохимических процессов в ризосфере.

Известно, что органические соединения фосфора составляют значительную долю общего фосфорного фонда почвы — от 20 до 80 %, включая нуклеиновые кислоты, производные аденозинфосфорной кислоты, фосфогуминовые комплексы, а также малоподвижные формы, такие как сахарофосфаты и глицерофосфаты [24,30]. Переход этих соединений в доступное для растений состояние осуществляется преимущественно посредством ферментативного гидролиза с высвобождением ортофосфатных ионов.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что включение фосфатмобилизирующих микроорганизмов в состав фосфорных удобрений способствует повышению их агрономической эффективности за счёт активации почвенной микробиоты и усиления ферментативных процессов трансформации фосфора. Применение «БМ-АММАФОС» в условиях серозёмов Ташкентской области обеспечивает более высокий уровень биологической доступности фосфора, что особенно важно для почв с выраженной буферностью и высокой способностью к фиксации фосфат-ионов.

Влияние на агрономические параметры и урожайность томата (*Solanum lycopersicum* L)

Результаты исследований показывают, что применение биомодифицированного удобрения «БМ-АММАФОС» оказывает выраженное стимулирующее влияние на рост, развитие и продуктивность растений томата по сравнению с традиционным «АММАФОС».





AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIK KARANTINI

Уже на ранней стадии вегетации (1 июля) отмечается преимущество вариантов с «БМ-АММАФОС». Высота растений увеличивалась с 28,7 см в контроле до 33,5 и 39,4 см при внесении «БМ-АММАФОС»₄₀ и «БМ-АММАФОС»₅₀ соответственно. Аналогичная тенденция наблюдалась по количеству листьев (7,6 → 8,3 → 10,4 шт.) и числу зачатков кистей (1,9 → 2,6 → 3,8 шт.). Количество цветков в вариантах с биомодифицированным удобрением также превышало контрольные значения более чем в 2–3 раза.

Таблица 2.

Влияние удобрения «БМ-АММАФОС» на рост, развитие и урожайность томата (*Solanum lycopersicum* L., сорт «Юсуповский»).

Признаки	Показатели изучаемых признаков опытных вариантов		
	«АММАФОС» ₈₀	БМ- »АММАФОС» ₄₀	БМ- »АММАФОС» ₅₀
1 июля			
Высота растений, см	28,7	33,5	39,4
Количество листьев, шт.	7,6	8,3	10,4
Количество зачатков кистей, шт.	1,9	2,6	3,8
Количество цветков, шт.	0,6	1,2	1,9
1 августа			
Высота растений, см	60,1	67,9	78,8
Количество листьев, шт.	16,2	19,5	24,0
Количество кистей, шт.	5,1	6,8	8,2
Количество цветков, шт.	9,3	12,4	14,6
Количество завязей, шт.	6,5	8,4	10,6
1 сентября			
Высота растений, см	88,6	99,5	119,3
Количество листьев, шт.	26,6	29,8	33,2
Количество незрелых плодов, шт.	8,2	10,1	13,4
Количество зрелых плодов, шт.	11,2	17,1	19,8
Урожайность, ц/га	26,4	32,9	39,4

В фазе цветения и начала плодоношения (1 августа) различия между вариантами усиливались. Высота растений в варианте «БМ-АММАФОС»₅₀ достигала 78,8 см против 60,1 см в контроле. Количество листьев увеличивалось до 24,0 шт. (против 16,2 шт.), число кистей — до 8,2 шт. (против 5,1 шт.), а количество цветков и завязей — до 14,6 и 10,6 шт. соответственно, что существенно превышает показатели традиционного удобрения.

К периоду массового плодоношения (1 сентября) наблюдается максимальное проявление эффекта. Высота растений при внесении «БМ-





AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

АММАФОС»₅₀ достигала 119,3 см, что на 34,6 % выше контроля. Количество листьев увеличивалось до 33,2 шт. (против 26,6 шт.), число зрелых плодов — до 19,8 шт., тогда как в контроле данный показатель составлял 11,2 шт. Отмечается также увеличение числа незрелых плодов, что свидетельствует о пролонгированном плодоношении растений.

Урожайность томата достоверно возросла при применении биомодифицированного удобрения: с 26,4 ц/га в контроле до 32,9 ц/га при дозе 40 кг/га и до 39,4 ц/га при дозе 50 кг/га. Прибавка урожайности составила соответственно 24,6 и 49,2 % по сравнению с традиционным аммофосом.

Таким образом, применение биомодифицированного удобрения «БМ-АММАФОС» оказывает комплексное стимулирующее влияние на морфогенез растений томата, способствуя усиленному формированию генеративных органов и повышению общей продуктивности культуры. Наиболее выраженный эффект отмечен при дозе 50 кг/га, что подтверждает высокую агрономическую эффективность биомодифицированной формы удобрения.

Включение микробных инокулянтов в состав фосфорных удобрений способствует более рациональному использованию элементов питания за счёт активации ризосферной микробиоты и усиления процессов трансформации труднорастворимых форм фосфора в доступные соединения. Это, в свою очередь, обеспечивает устойчивое повышение продуктивности сельскохозяйственных культур в условиях почв с низкой подвижностью фосфора.

Полученные результаты согласуются с данными других исследователей. Так, в работе Gupta et al. (2015) показано, что применение фосфатмобилизирующих бактерий обеспечивает увеличение урожайности зерновых и бобовых культур на 15–30 % в условиях щелочных почв Южной Азии [33]. Результаты современных метаанализов также подтверждают, что использование микробных биостимуляторов, включая штаммы рода *Bacillus*, способствует повышению доступности элементов питания и интенсификации ростовых процессов у различных сельскохозяйственных культур [34–36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты полевых и лабораторных исследований свидетельствуют о высокой агрономической и агроэкологической эффективности биомодифицированного фосфорного удобрения «БМ-АММАФОС» по сравнению с традиционным «АММАФОС». Интродукция фосфатмобилизирующего штамма *Bacillus subtilis* BS-26 в состав удобрения способствовала повышению активности почвенных фосфатаз, пролонгированному сохранению подвижных форм фосфора в ризосфере и более эффективному использованию питательных элементов растениями томата.





AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

Анализ динамики подвижного P_2O_5 показал, что через 30 суток после внесения удобрений в почве сохранялось до 90–98 мг/кг доступного фосфора при применении «БМ–АММАФОС», тогда как в варианте с традиционным аммофосом данный показатель не превышал 36–38 мг/кг. Это указывает на существенное снижение процессов фиксации фосфора в труднорастворимые формы и повышение его биодоступности.

На фоне усиленной ферментативной активности почвы и активации микробиологических процессов отмечено достоверное улучшение биометрических показателей растений томата, включая увеличение высоты растений, количества листьев, генеративных органов (кистей, цветков, завязей и плодов). Применение «БМ–АММАФОС» в дозе 50 кг/га обеспечило формирование урожайности на уровне 39,4 ц/га, что на 49,2 % выше контроля и на 19,8 % превышает показатели варианта с дозой 40 кг/га.

Таким образом, использование биомодифицированных фосфорных удобрений представляет собой эффективное направление повышения продуктивности сельскохозяйственных культур в условиях карбонатных серозёмных почв. Применение «БМ–АММАФОС» обеспечивает более рациональное использование фосфорных ресурсов, снижает потери элемента вследствие фиксации и способствует устойчивой интенсификации земледелия в условиях орошаемых агроэкосистем Центральной Азии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Йулдошев ШУ, Джуманиязова Г. И, Ниязметов У. Х. / Проблемы фосфорных минеральных удобрений // *Agro kimyo himoya va o' simliklar karantini*. № 4. 2022. Ст 57-59
2. Wang, Xin; Liu, Jiansheng; Zhang, De; Li, Yun; Yang, Wei; Li, Ying. (2021). Effects of long-term phosphorus fertilization on soil phosphorus dynamics and crop yield: A global meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 309, 107278. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107278>. 245.
3. Shokir Yuldoshev, Gulnara Jumaniyazova, Saida Zakiryaeva, Burkhon Elmuradov. / Immobilization of phosphate-solubilizing microorganisms in granules of phosphorus mineral fertilizers // *Universum: chemistry and biology: electron. scientific journal*. 2022. 11(101). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/14519>.
4. Zhang, L. (2020). Phosphorus transformation and availability in soils: a review. *Soil Use and Management*, 36(3), 329–343.
5. Йулдошев Ш.У. Джуманиязова Г. И Закиряева С. И. Элмурадов Б. Ж. / Исследование фосфатсольбилизирующей активности микроорганизмов иммобилизованных в гранулы фосфорных минеральных удобрений // *Universum: химия и биология: электрон. научн. журн*. 2022. 11(101). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/14518>. P 31-34.



AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIK KARANTINI

6. Withers, P. J. A., Doody, D. G., & Sylvester-Bradley, R. (2018). Sustainable phosphorus management in agricultural soils: a global perspective. *Advances in Agronomy*, 147, 1–74.
7. Джуманиязова Г., Нарбаева Х., Махмудова К., Закирьяева С., Бабина А. (2018) Влияние модифицированных с помощью бактериального удобрения Fosstim-3 биоминеральных удобрений на рост и развитие проростков красного горького перца. *Web of Scholar*. 6(24), Vol.4. с. 54-59. doi: 10.31435/rsglobal_wos/12062018/5731
8. Vassilev, N., Vassileva, M., Martos, V., García del Moral, L. F., Kowalska, J., Tylkowski, B., Mendes, G., & Malusá, E. (2020). Biofertilizers based on phosphate-solubilizing microorganisms: Innovations and challenges. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(14), 5721–5730.
9. Джуманиязова Г.И., Закирьяева С.И., Нарбаева Х.С., Зарипов Р.Н., Бережнова В.В., Караходжаева Х.Т., Икрамова С.Н., Ким А.А., Ядгаров Х.Т. // Патент UZ № IAP 04712. Штамм фосформобилизующих бактерий *Bacillus subtilis* BS-26 с полифункциональными свойствами для использования в растениеводстве.
10. Zhao, K., Zhang, H., Zhang, Y., Li, X., Ren, T., & Liu, B. (2022). Mechanisms of microbial phosphate solubilization and transformation in soil. *Environmental Pollution*, 298, 118760.
11. Mäder, P., Fließbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 296(5573), 1694–1697.
12. Puglisi, E., Romani, M., Galletti, S., & Trevisan, M. (2020). Microbial biofertilizers in organic agriculture: Current status and future perspectives. *Agronomy*, 10(3), 398.
13. Rashidova D.K., Yuldoshev Sh.U., Yunusova S.Yu., Mirzamova B.K., Daminova D.M., Mamedov N.M., Yakubov M.M. Influence of new organic fertilizers on the growth, development and yield of cotton and soil phosphatase activity. *Journal of Advanced Zoology*. Volume 44 Special Issue-2 Year 2023 Page 5107:5117. ISSN: 0253-7214. <https://jazindia.com>.
14. Glick, B.R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, 963401.
15. Karimov, K. K., Khasanov, S. A., Mamatov, F. M., & Rasulov, B. R. (2021). Assessment of phosphorus availability and fixation in irrigated calcareous soils of Uzbekistan. *Eurasian Soil Science*, 54(5), 675–682.
16. Yuldoshev Sh. U., Asatova S. S., Tashpulatova F. Sh. Study of the Kinetics of Changes in the Mobile Forms of P₂O₅ of Traditional and Biomodified Fertilizers in the Soil. *International Journal of Biological Engineering and Agriculture*. Volume 2 | No 10 | Oct -2023. P. 61-64. ISSN: 2833-5376



AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

17. Rashidov, F.T. (2018). Efficiency of phosphorus fertilizers under cotton cultivation in the light serozem soils. *Journal of Agricultural Science*, 21(3), 201–207.
18. Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe, and L. A. Dean. 1954. "Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate." *USDA Circular No. 939*. P 1-22.
19. Murphy J., Riley J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27: 31–36.
20. Хазиёв Ф.Х. Методы почвенной энзимологии / Ф.Х. Хазиёв; Ин-т биологии Уфим. ИЦ. - М.: Наука. 2005. - 252 с. - ISBN 5-024)33940-7. ст 184-186
21. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. -М.: Колос, 1985.- 352 с.
22. Дала тажрибаларини ўтказиш услублари. ЎзПТИ. -Тошкент, 2007. -Б 147
23. Sharma, S. B., R. Z. Sayyed, M. H. Trivedi, and T. A. Gobi. 2013. "Phosphate Solubilizing Microbes: Sustainable Approach for Managing Phosphorus Deficiency in Agricultural Soils." *SpringerPlus* 2: 587. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>.
24. Yuldoshev Sh. U., Asatova S. S., Tashpulatova F. Sh. Biomodified Phosphorus Fertilizers (Bmpfs) are New and Promising Forms of Phosphorus Fertilizers. *International Journal of Biological Engineering and Agriculture*. Volume 2 | No 12 | Dec -2023. p. 205-212. ISSN: 2833-5376
25. Kalayu, G. 2019. "Phosphate Solubilizing Microorganisms: Promising Approach as Biofertilizers." *International Journal of Agronomy* 2019: 1–7. <https://doi.org/10.1155/2019/4917256>.
26. Yuldashev Sh.U., Botirov R., A., Saidova G.,E., Sadykov A.,Z., Sagdullayev Sh.,Sh. Study of the waste of the medicinal herb capparispinosa as a substrate for phosphate mobilizing microorganisms (PMM). *Sciences of Europe* # 126, (2023). ISSN 3162-2364. P. 3-9. www.european-science.org.
27. Van Syoc, Emily, Shannon E. Albeke, John Derek Scasta, и Linda T. A. van Diepen. 2021. «Quantifying the Immediate Response of the Soil Microbial Community to Different Grazing Intensities on Irrigated Pastures». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 326: 107805. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107805>
28. Rodríguez, H., and R. Fraga. 1999. "Phosphate Solubilizing Bacteria and Their Role in Plant Growth Promotion." *Biotechnology Advances* 17 (4–5): 319–339. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2).
29. Сакбаева З.И. Влияние ферментативной активности фосфатаз на экологическое состояние сероземных почв предгорий ферганы. *Современные проблемы науки и образования*. - 2014. - № 5. С. 11-17. doi 10.17513/spno.2014.5.



AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

30. Bargaz Adnane, Lyamlouli Karim, Chtouki Mohamed, Zeroual Youssef, Dhiba Driss/Soil Microbial Resources for Improving Fertilizers Efficiency in an Integrated Plant Nutrient Management System//J. *Frontiers in Microbiology*.VOL.- 9. 2018. P - 1606. DOI=10.3389/fmicb.2018.01606. ISSN=1664-302X.
31. Alimova, D., R. Karimov, and M. Turaeva. 2019. "Soil Enzyme Activities as Affected by Phosphate-Solubilizing Microorganisms in Cotton Fields of Uzbekistan." *Eurasian Soil Science* 52 (7): 865–874.
32. Egamberdieva, D., G. Wirth, L. Behrendt, and R. Abdiev. 2020. "Phosphate-Solubilizing Bacteria Stimulate Enzymatic Activity and Enhance Phosphorus Availability in Salt-Affected Soils of Central Asia." *Applied Soil Ecology* 147: 103377.
33. Gupta, R., K. K. Dubey, and R. Maheshwari. 2015. "Phosphate Solubilizing Microorganisms and Their Role in Plant Growth and Yield Improvement." *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 4(4): 989–1001.
34. Backer, Rachel, Gabriela Saeed Khanlou, Zihui Sun. 2018. "Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Road»Аммафос« to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture." *Frontiers in Plant Science* 9: 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>.
35. Vassilev, Nikolay, María A. Vassileva, R. Martos. 2020. "Microbial Solubilization of Nutrients from Mineral Phosphates and Organic Matter as a Plant Nutrition Strategy." *Agronomy* 10(1): 39. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010039>.
36. Zhang, Hongyuan, Yu Liu, Xiaomei Chen. 2022. "Harnessing Bacillus spp. as a Plant Growth-Promoting Rhizobacteria for Sustainable Agriculture." *Journal of Applied Microbiology* 133(1): 70–88. <https://doi.org/10.1093/jambio/lxac055>
37. Shukurov, T., Egamberdieva, D., & Wirth, S. (2020). Phosphate-solubilizing bacteria and their role in soil fertility management in Central Asia. *Agriculture*, 10(11), 537. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110537>.