

Биомодифицированные Фосфорные Удобрения (БМФУ), Как Альтернатива Для Решения Проблем Фосфорных Удобрений

*Ш. У. Йулдошев¹, Асатова Саодат Саидовна²,
Ахмаджонова Гулноза Анваржоновна³, Рўзматовуа Севинч Бахтиёр кизи⁴*

Аннотация Исследовано биомодифицированные фосфорные удобрения (БМФУ), установлено, что споры клеток ФММ на гранулах БМФУ-Аммофос в течение 12 месяцев хранения хорошо сохраняют жизнеспособность, без существенных потерь титра. При этом сохранность титра клеток штамма ФММ в течение 12 месяцев хранения составил на уровне 8,8 lg КОЕ/г, при исходном титре 11,2 КОЕ/г. Имобилизованные на минеральных удобрениях клетки ФММ показали лучшие результаты по растворению $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ в сравнении со свободными клетками ФММ (СВ-ФММ) хранившиеся на скошенном агаре при температуре 4-5 °С, с периодическими пересевами. Уровень растворение $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ с выделением P_2O_5 в среду наблюдалось в варианте опыта БМФУ-Аммофос, на 6 сутки инкубации и составил 77 мг/100мл. В то время как, количество P_2O_5 , высвобождаемого из $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ микроорганизмами СВ-ФММ в течение 1-12 сутки инкубации составило 55-72 мг/100мл. Исследовано кинетики изменений подвижных форм P_2O_5 традиционных (Аммофос) и биомодифицированных (БМФУ-Аммофос) удобрений в почве. Показано, что содержание подвижных форм P_2O_5 БМФУ в течение 30 дней снизились от 156, до 98 мг/кг, в то время как, содержание P_2O_5 традиционных фосфорных удобрений в почве снижается значительно (от 157 до 30 мг/кг).

Ключевые слова: Биомодифицированные удобрения, фосфорные удобрения, фосфатмобилизирующие микроорганизмы, иммобилизация, усвоения, фосфор.

Введение. Значение фосфора. Фосфор в виде P_2O_5 является лимитирующим и основополагающим элементом из минеральных питательных веществ, необходимого для роста, развития и размножения растений [1-7]. Фосфор не только является основным компонентом фундаментальных макромолекул, таких как нуклеиновые кислоты и фосфолипиды, но также играет важную роль в передаче энергии и регуляции ферментативных реакций и метаболических путей [1-2]. Он принимает участие в контроле и регуляции главных ферментативных реакций и метаболических путей как на уровне растительных клеток, так и на организменном уровне [3]. Кроме того, фосфор является важным элементом формирования корневой системы, бутонов и семян, ускоряет прорастание семян. Поэтому фосфор имеет решающее значение для производства продуктов питания, так как все растения нуждаются в достаточном количестве его для успешного роста. Дефицит фосфора приводит к снижению урожайности [1-7]. Фосфор необходим не только для растений, но и для всех живых организмов. Интересно отметить, что среднему взрослому человеку требуется около одного грамма фосфора в день. Чтобы обеспечить сбалансированное питание одного человека, современному сельскому хозяйству требуется добыча в 22,5 кг фосфоритов в год [3,4].

¹PhD по химическим наукам. с.н.с. Институт химии растительных веществ АН РУз им. акад. С.Ю.Юнусова. 100170. Узбекистан, Ташкент факс

² Кандидат сельскохозяйственных наук. Доцент Ташкентский государственный аграрный университет. Кафедра Агрохимии и почвоведение, Uzbekistan

³ стажер-исследователь, Институт общей и неорганической химии АН РУз

⁴ студент Ташкентский государственный аграрный университет.

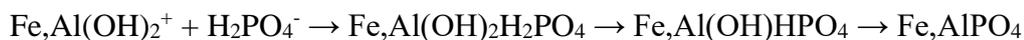


Проблемы, связанные с фосфатными запасами. Фосфатные запасы мира географически распределены неравномерно, что существенно влияет на стоимость данного сырья связанной с транспортными расходами. Несмотря на некоторые краткосрочные колебания цен на фосфатные породы, мировое производство фосфорных удобрений неуклонно возрастало со скоростью 3-4% ежегодно, и в течение половины второго столетия до 2011 года увеличилось более чем в четыре раза (от 46 млн. тонн в 1961 году до 198 млн. тонн в 2011 году) [3-8]. Поскольку численность населения продолжает расти, согласно прогнозам, это число к 2050 году увеличится на 50-100% [3]. Ресурсы фосфатного сырья невозобновляемы. По мнению международных экспертов, при нынешних темпах потребления человечество может исчерпать известные ископаемые запасы уже через 40 лет [8-12].

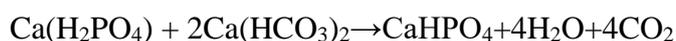
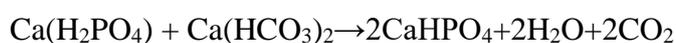
Проблемы традиционных фосфорных удобрений. По оценкам результатов химических и агрохимических исследований последних лет выявлено, что, в зависимости от типа почвы, ее существующего физического состояния и химического статуса, не более 8-10% фосфора, внесенного в почву с удобрениями, усваивается сельскохозяйственными культурами [3,8,9]. При внесении водорастворимых форм фосфорных удобрений в почву около 30-40% P_2O_5 уже через 15 минут переходит в водонерастворимое состояние. Почти полный переход пяти окиси фосфора (95,5%) в нерастворимую форму происходит в течение месяца после внесения фосфорных удобрений в почву [3]. В итоге в зависимости от вида, состояния и биологической активности почв в них может накапливаться до 0,2-0,4% (к весу почвы) неусвояемых закреплённых фосфатов, что в пересчёте на один гектар пахотного горизонта составит от 3 до 6 и более тонн P_2O_5 [3,9]. Тем не менее для предотвращения недобора урожая внесение фосфорных удобрений в сельскохозяйственные почвы ежегодно увеличивается на 3,2% и более в зависимости от состояния почв [1,7].

Ныне существующие традиционные виды удобрений не обеспечивают их рентабельное производство и применение, при которых неизбежно образование тех или иных многотоннажных отходов и большие потери фосфора в результате его закрепления в почвах. Фосфор усваивается растениями в виде аниона фосфорной кислоты, главным образом, в виде дигидрофосфата ($H_2PO_4^-$). Все легкорастворимые формы фосфора, вносимые с минеральными удобрениями, в почве быстро переходят в недоступной для растений форму соединений фосфатов [10].

Низкая доступность фосфора обусловлена рядом причин, одно из основных является образование нерастворимых комплексов с катионами почвы в зависимости от значений pH почвы [3,10]. Так, в кислых почвах гидроксиды железа и алюминия образуют с фосфат-ионами ряд слаборастворимых и практически недоступных для растений соединений



В нейтральных и щелочных карбонатных почвах, содержащийся в них гидрокарбонат кальция связывает фосфат ионы в нерастворимые фосфаты [11]:



Другая причина потери фосфора вносимый в виде удобрений — это иммобилизация микроорганизмами и превращение неорганических соединений фосфора в органические формы в процессе развития живых организмов. При этом в микробных клетках фосфор включается в состав молекул фосфолипидов, нуклеиновых кислот или других фосфорсодержащих органических соединений и становится недоступным для растений. В итоге более 90-92% фосфора в почве становится неподвижным и недоступным для растений из-за адсорбции, выпадения в осадок или превращения в органическую форму [3-12].



Экологические проблемы фосфорных удобрений. Поскольку растения могут поглощать только небольшое количество фосфора, большая часть фосфорных удобрений скапливается в почве и попадает в водоемы, что чревато экологическими, санитарными и финансовыми проблемами [13,14].

Отрицательное действие удобрений на почву и окружающую среду связано прежде всего с химическим составом удобрений. Существенными недостатками многих минеральных, в том числе и фосфорных удобрений являются:

- наличие остаточной кислоты (свободная кислотность). Длительное применение высоких норм физиологически кислых или щелочных удобрений изменяет реакцию почвенного раствора, приводит к потерям гумуса, увеличивает подвижность и миграцию многих элементов.
- наличие в них тяжелых металлов (F₂,Cd,Sr,Pb,Ni). Наиболее загрязнены тяжелыми металлами фосфорные и комплексные удобрения. Это связано с тем, что практически все фосфорные руды содержат большие количества стронция, редкоземельные и радиоактивные элементы. Содержание фтора в суперфосфате достигает 1-1,5, в аммофосе 3-5%. В среднем с каждой тонной необходимого растениям фосфора на поля поступает около 160 кг фтора [14-15].

Таким образом проблемы фосфорных удобрений является одним из самых критических проблем, связанной с экономической, экологической, продовольственной безопасностью и устойчивой интенсификацией сельского хозяйства. Небрежное отношение и расточительство фосфатных запасов в ближайшем будущем непременно приведет к ряду непоправимых ошибок, таких как:

- исчерпание запасов фосфоритов, недостаток фосфора, падение урожайности сельхоз культур;
- ост цен на фосфорные удобрения;
- экологические проблемы, связанные с чрезмерным использованием фосфорных удобрений (зафосфачивание, засоление и загрязнение почв тяжелыми металлами). Избыток фосфора в почве снижает доступность растениям цинка и железа;
- повышение реальной угрозы здоровью населения за счет загрязнения почв и сельхоз продуктов тяжелыми, редкоземельными и радиоактивными элементами.

Альтернатива для решения проблемы. Среды существующих возможностей, проблему можно решить биотехнологическими методами, как менее затратного и высокоэффективного метода по сравнению с обычными физико-химическими способами. Метод основывается на применении микроорганизмов, способных растворять и повышать усвояемость растениями недоступных форм почвенного фосфора. [3,16]. Еще в начале века было установлено, что некоторые микроорганизмы, в особенности некоторые бактерии и микоризные грибы, способны растворять фосфаты и усиливать поступление фосфора в растение. Таких микроорганизмов называют фосфатмобилизирующими микроорганизмами (ФММ) [17].

Основные механизмы ФММ, обеспечивающий мобилизацию труднодоступных соединений фосфора, является выработка ими различных органических кислот (глюконовая, пировиноградная, уксусная, щавелевая, уксусная, яблочная, молочная, лимонная). Продукция органических кислот микроорганизмами сопряжены чаще всего с выработкой ферментов фосфатаз, а также других биологически активных метаболитов, таких как ИУК, сидерофоры, антифунгальные метаболиты [46-50]. Накопленные данные позволяют сделать вывод о фундаментальном вкладе ФММ в фосфорном питании растений и их влиянии на показатели роста. Эффективность растворения минеральных соединений фосфора может быть достаточно высокой, данные по количеству доступного фосфора могут полностью удовлетворить потребности растительного организма [18,19].



Учитывая вышесказанные одним из эффективных путей в решении проблемы фосфорного питания растений, является разработка более эффективных и экологически совершенных форм удобрений, путем биомодификации фосфорсодержащих минеральных удобрений на основе эффективных штаммов ФММ и получения принципиально новых видов биомодифицированных фосфорных удобрений (БМФУ). Данный способ является на сегодняшний день одним из самых перспективных и действенных способов повышения эффективности использования фосфорных удобрений и снижение норм внесения, позволяющий повысить окупаемость удобрений прибавкой урожая [9-13].

Цель работы: Исследование БМФУ, разработанной в Институте Химии растительных веществ АН РУз, на основе отечественного фосфорного удобрения Аммофос и штамма ФММ *Bacillus subtilis* BS-26,

Объекты и методы исследований

Объектами исследований являлись БМФУ на основе ФММ штамма *Bacillus subtilis* BS-26: БМФУ-Аммофос, традиционная фосфорная удобрения Аммофос и свободные клетки ФММ штамма *Bacillus subtilis* BS-26 и (СВ-ФММ) хранившиеся на скошенном агаре.

Определение жизнеспособности клеток (КОЕ) фосфатмобилизирующего штамма *Bacillus s. BS-26* иммобилизованного на гранулы БМФУ-Аммофос, в периоды 3, 6 и 12 месяцев хранения удобрения проводили по методу Коха [19]. Проба опытного БМФУ (10 г) измельчают в ступке, помещают в колбу со 100 мл стерильной воды и встряхивают. Стерильной пипеткой 1 мл исследуемого материала переносят в пробирку с 9 мл стерильной воды. Если исследуемый материал уже был разведен в 100 раз, получают разведение 1:1000. Затем этой же пипеткой берут 1 мл полученного разведения и переносят его во вторую пробирку – получают разведение 1:10000.

На поверхность заранее подготовленной среды, стерильной пипеткой наносят точно измеренный объем (0,1 мл) соответствующего разведения и равномерно распределяют по поверхности среды. Из каждого разведения делают 4-6 параллельных высевов. Чашки с засеянными средами помещают в термостат, отрегулированный на температуру 30 °С, благоприятную для развития выявляемых организмов. Подсчет бактерий производят через трое суток. Подсчитывают количество колоний, выросших в чашке Петри, и делают пересчет на 1 г. Результаты параллельных высевов суммируют и вычисляют среднее число колоний, выросших при высеве из этого разведения.

Количество микроорганизмов в 1 г (1 мл) исходного субстрата вычисляют по формуле:

$$T = a \cdot b \cdot c / d,$$

где T – количество микроорганизмов в 1 г, a – количество подсчитанных колоний, b – разведение, из которого произведен высев, c – 10 (если на чашки высевали 0,1 мл суспензии), d – масса субстрата (БМФУ), взятого для анализа.

Для определения фосфатрастворяющей активности БМФУ, 1 мл исследуемого материала использованной для определения жизнеспособности клеток, инокулировали в 100 мл в среду Пиковской с использованием нерастворимого $Ca_3(PO_4)_2$ в качестве единственного источника фосфора при pH 7,0. Субстрат инкубировали при 30 °С на вращающемся шейкере при 150 об/мин. Через 7 дней 5,0 мл раствора центрифугировали при 10000 об/мин в течение 10 мин и пропускали через нейлоновый фильтр 0,45 мкм. Количественное измерение солификации фосфатов проводили на спектрофотометре UV-6100 (Shanghai Metash Instruments Co., Ltd., Шанхай, Китай) при 700 нм на основе колориметрического метода Mo-Sb [19], и был рассчитан в соответствии со стандартной кривой KH_2PO_4 . В качестве контроля использовали свободные клетки ФММ (СВ ФММ) Измерение растворенного P_2O_5 в культуральной жидкости проводили через 1, 6, и 12 сутки инкубации субстрата.



Для исследования кинетики изменений подвижных P_2O_5 форм традиционных удобрений и БМФУ в почве использовали типичный серозем взятой в слое 0-25 см. Образцы почв высушивали до воздушно-сухого состояния и вносили удобрений из расчета по 200 мг/0,5 кг почвы, тщательно перемешивали и переносили в склянки, равномерно увлажняли дистиллированной водой до 60% от полной влагоемкости. В качестве контроля - почва без внесенных удобрений. С такой влажностью образцы хранились до определения подвижных P_2O_5 .

Содержание в почве подвижных форм фосфора (P_2O_5) определяли по методу Олсена [20]. Метод основан на извлечении подвижных фосфатов почвы с помощью 0,5 н. раствора $NaHCO_3$ (рН 8,5), соотношение почва: раствор = 1:20, время взаимодействия 30-мин, температура $25 \pm 1^\circ C$.

Измельченный и пропущенной через сито с диаметром отверстий 1 - 2 мм, 5 г предварительно высушенного до воздушно-сухого состояния почвы, помещают в колбы емкостью 200 - 250 cm^3 . Приливают 100 cm^3 0,5 н. раствора $NaHCO_3$, прибавляют 1-3 г активированного угля и на ротаторе взбалтывают в течение 30 мин. После чего фильтруют и 5-40 cm^3 бесцветного прозрачного фильтрата переносят в мерные колбы на 100 cm^3 , осторожно нейтрализуют по 6-динитрофенолу 10%-й HCl , перемешивают, чтобы удалить выделяющиеся пузырьки CO_2 , и приливают реактивы для окрашивания раствора для фотометрирование [20,21].

Вытяжки почв для определения подвижных фосфатов готовились в разные сроки: через 15 мин; через час; через 3 дня; через 10 дней и через 30 дней после внесения удобрений.

Результаты исследования и обсуждение.

Одной из основных задач при исследовании биомодификации традиционных фосфорных удобрений является жизнеспособность и сохранность биологических агентов на грануле удобрений. В связи с чем, нами исследовано жизнеспособность клеток фосфатмобилизирующего штамма *Bacillus s. BS-26* на гранулах БМФУ-Аммофос, в периодах хранения 3,6 и 12 месяцев.

Результаты экспериментов по установлению жизнеспособности и сохранности спор клеток ФММ на гранулах БМФУ-Аммофос показали, что иммобилизованные в гранулы удобрений микроорганизмы, в течение 12 месяцев хранения хорошо сохраняют жизнеспособность, без существенной потери титра клеток (рис. 1).

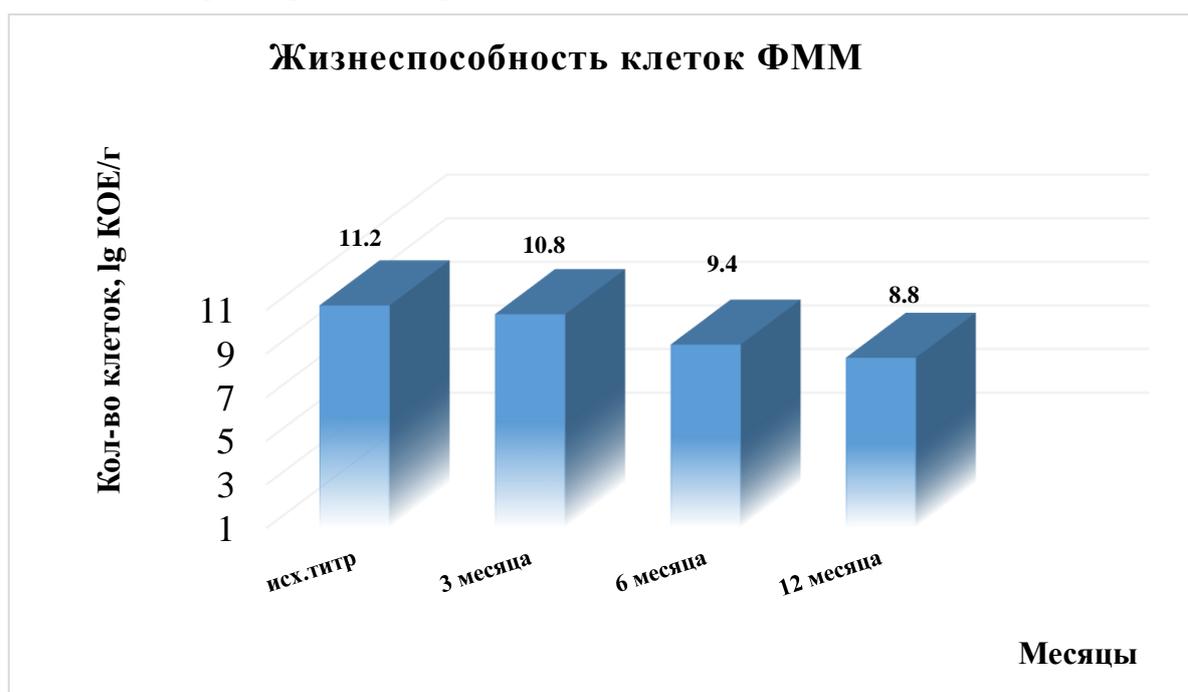


Рис.1. Жизнеспособность клеток ФММ штамма *Bacillus subtilis BS-26* на гранулах БМФУ-Аммофос в течение 12 месяцев хранения.



При этом сохранность титра клеток штамма ФММ в течение 12 месяцев хранения составил на уровне 8,8 Ig КОЕ/г, при исходном титре 11,2 КОЕ/г. Потери жизнеспособности клеток ФММ в гранулах БМФУ-Аммофос в течение хранения 12 месяцев составило на уровне 30 %.

Эксперименты по исследованию сохранности клеток, иммобилизованных ФММ в гранулы БМФУ-Аммофос показали, что, споры штамма практически не теряют свою жизнеспособности и активности иммобилизованном состоянии на минеральных удобрениях в течение года. Полученные результаты хорошо коррелируют результатами исследователей [22], которые установили, что, титр жизнеспособных спор *Bacillus subtilis* в сухой препаративной форме с исходным титром препарата $9,1 \cdot 10^9$ спор в 1 гр, после 5, 36, и 75 месяцев хранения составлял $8,6 \cdot 10^9$; $5,7 \cdot 10^9$ и $2,7 \cdot 10^9$ спор/г соответственно. После 6 лет хранения препарата титр жизнеспособных спор был сопоставим с таковым в жидкой форме препарата, применяемой в настоящее время и не подлежащей длительному хранению [22].

Результаты экспериментов по установлению фосфатмобилизирующей активности БМФУ-Аммофос показал, что, иммобилизованные на минеральных удобрениях клетки ФММ показали лучшие данные по растворению $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ по сравнению со свободными клетками ФММ (СВ-ФММ) хранившиеся на скошенном агаре при температуре 4-5 °С, с периодическими пересевами (рис.2).

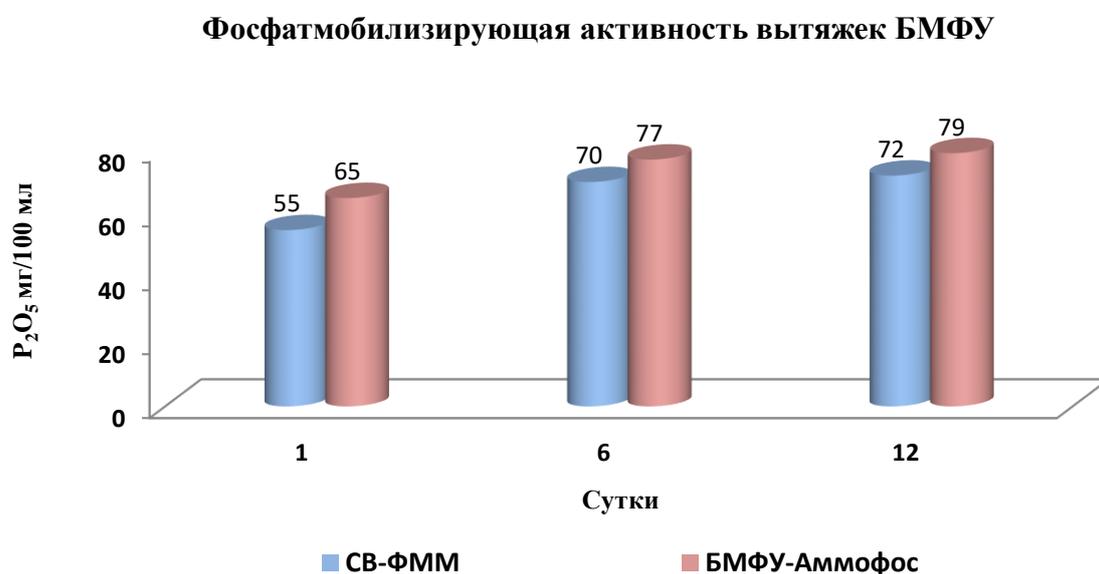


Рис. 2. Фосфатмобилизирующая активность вытяжек БМФУ-Аммофос на основе штамма ФММ. в жидкой среде Пиковской.

Фосфатмобилизирующая активность вытяжек БМФУ-Аммофос в жидкой среде Пиковской показал, что количества, выделяемые в среду P_2O_5 в течение 1-12 сутки инкубации составил 55-79 мг/100мл. При этом у всех вариантов наибольшая количества $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ растворилась в течение 6-й сутки инкубации. Самый высокий уровень растворение $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ с выделением P_2O_5 в среду наблюдалось в варианте опыта БМФУ-Аммофос, на 6 сутки инкубации и составил 77 мг/100мл. Количество P_2O_5 , высвобождаемого из $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ микроорганизмами СВ-ФММ в течение 1-12 сутки инкубации составило 55-72 мг/100мл.

Результаты эксперимента показали, что испытанные ФММ БМФУ-Аммофос и СВ-ФРБ имели неодинаковой диапазон вариаций эффективности фосфатмобилизации, что соответствует мнениями исследователей [23], которые поясняют, что эффективность фосфатмобилизации в первую очередь зависит от жизнеспособности микроорганизмов, продукции органических кислот, фермента фосфатазы и состава среды. Видимо физико-химические параметры среды и условия хранения, оказывают существенные влияние на жизнеспособности и физиологические процессы микроорганизмов.



В исследованиях авторов [24,25] находим указание, что органические кислоты, секретируемые почвенными микроорганизмами, могут способствовать переходу в почвенный раствор как минеральных, так и органических фосфатов, после чего становится возможным ферментативное освобождение фосфатной группы фосфатазами. В эксперименте сравнивали кинетики изменений подвижных P_2O_5 форм традиционных (Аммофос), и биомодифицированных (БМФУ-Аммофос) удобрений в почве.

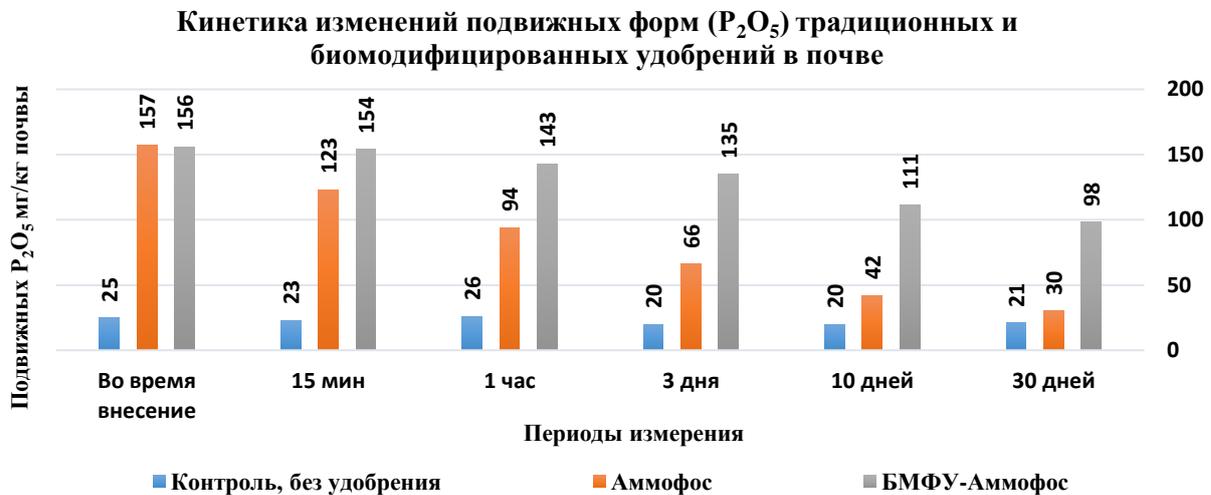


Рисунок 1. Кинетика изменений подвижных форм (P_2O_5) традиционных и биомодифицированных удобрений в почве

Результаты исследования кинетики изменений подвижных форм P_2O_5 традиционных (Аммофос) и биомодифицированных (БМФУ-Аммофос) удобрений в почве показали, что содержание подвижных форм P_2O_5 БМФУ в течение 30 дней снизилось от 156, до 98 мг/кг, в то время как, содержание P_2O_5 традиционных фосфорных удобрений в почве снижается от 157 до 30 мг/кг. В почвах контрольного варианта (без внесения удобрений) содержание P_2O_5 в течение месяца колеблется незначительно (25-21 мг/кг почвы). Необходимо отметить, что значительное снижение P_2O_5 традиционных удобрений (от 157, в момент внесения, до 123 мг/кг) начинается уже через 15 минут после внесения удобрений в почву, что согласуется результатами авторов [26], которые установили, что при внесении водорастворимых форм фосфорных удобрений в почву около 30+40 % подвижных форм P_2O_5 закрепляется почвенными минералами уже через 15 мин. При этом степень закрепления сильно зависит от состава почв и почвенных растворов в зоне применения. Так в кислых почвах, P_2O_5 связана преимущественно с железом и алюминием в форме $FePO_4$ и $AlPO_4$, а при избытке полуторных оксидов - преимущественно в виде основных солей — $Fe_2(OH_3)PO_4$ и $Al_2(OH_3)PO_4$. А в щелочных и слабощелочных почвах, происходит образование таких слаборастворимых солей фосфора, как $CaHPO_4$; $Ca_3(PO_4)_2$; $MgHPO_4$; $Mg_3(PO_4)_2$ и труднорастворимый - гидроксилapatит $Ca_5(PO_4)_3OH$. [2,12,13].

Снижение подвижных форм P_2O_5 БМФУ в почве происходит значительно медленно по сравнению с традиционными удобрениями. При этом наибольший уровень подвижных форм P_2O_5 удобрения (98 мг/кг почвы), через месяц после внесения, обнаружено в почве внесенный БМФУ-Аммофос. По мнению исследователей, основным механизмом, обеспечивающим мобилизацию труднодоступных соединений фосфора, является выработка микроорганизмами различных органических кислот, таких как, глюконовая, пировиноградная, уксусная, щавелевая, уксусная, яблочная, молочная, лимонная кислота. Кроме того, продукция органических кислот часто сопряжена с выработкой фосфатаз, чаще всего щелочных, а также других биологически активных метаболитов, таких как ИУК, сидерофоры, антифунгальные метаболиты [1,3,16,26].

Анализ результатов исследования кинетики изменений подвижных форм P_2O_5 традиционных и биомодифицированных удобрений в почве показали, что, кинетика снижения подвижных форм



P_2O_5 в неусвояемую форму зависит от времени взаимодействия удобрений с почвой. При этом подвижные формы P_2O_5 БМФУ-Аммофос в почве сохраняются значительно долго по сравнению с традиционными фосфорными удобрениями. Видимо это связано физиологической активностью иммобилизованного в гранулы БМФУ фосфатмобилизирующего штамма *Bacillus s. BS-26*, выделяющий в среду органические кислоты, ферменты и других метаболитов, препятствующий закреплению P_2O_5 почвенными минералами и растворяющий труднодоступных фосфатов почв.

Выводы и обсуждения

Результаты проведенных экспериментов показали, что БМФУ сочетающая в себе минеральные и биологические составляющие, могут быть отличным альтернативным удобрением к традиционным фосфорным удобрениям. При этом модифицированные удобрения отличались относительным простотой применения, эффективны с экологической и экономической точки зрения. Сочетание минеральных элементов и биологически активных метаболитов ФММ благоприятно влияют на рост и развитие и физиологию растений в целом. Можно отмечать и других положительных эффектов ФММ на рост растений: подавление болезней, вызываемых фитопатогенами (возможно, за счет конкуренции с патогенными микроорганизмами за колонизацию корней), микробный синтез регуляторов роста растений, снижение уровня этилена в корнях растений [27-28].

Полученные результаты согласуются с последними научными открытиями о том, что органические кислоты и фитазы, продуцируемые микроорганизмами играют фундаментальную роль в усвоении растениями недоступных форм минерального и органического фосфора почвы [1,3,27-29]. В связи с чем биологически активные метаболиты ФММ из-за их потенциально существенной агрономической и экологической ценности для роста растений в условиях недостатка усвояемого фосфора в почве, становятся привлекательной мишенью для агропромышленного использования [30].

Таким образом, БМФУ на основе ФММ, можно рассматривать как эффективный, экономичный и экологически безопасный подход к повышению КПД и снижению норм внесения традиционных фосфорных удобрений, а также биодоступности почвенного закрепленного фосфора.

Литература

1. Nguyen Hue. Phosphorus Nutrient in Organic Farming - A Review. *Mod Concep Dev Agrono.* 13(4). MCDA. 000820. 2024. DOI: 10.31031/MCDA.2024.13.000820.
2. Bird RP, Eskin NAM. The emerging role of phosphorus in human health. *Adv Food Nutr Res.* 2021;96:27-88. doi: 10.1016/bs.afnr.2021.02.001. Epub 2021 Apr 15. PMID: 34112356.
3. Йулдошев Ш. У., Джуманиязова Г. И., Ниязметов У. Х., Проблемы фосфорных минеральных удобрений // *Agro kimyo himoya va o'simliklar karantin.* №4. 2022. ст 57-59.
4. Sosth`ene P.-M. Ung, Chao-Jun Li. From rocks to bioactive compounds: a journey through the global P(v) organophosphorus industry and its sustainability. *RSC Sustainability*, 2023, 1, 11–37 | 31. <https://doi.org/10.1039/d2su00015f>.
5. Hans Lambers. Phosphorus Acquisition and Utilization in Plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2022. Vol. 73:17-42. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-125738>.
6. Akimova A.S. Phosphorus cycle in the soil / [International Research Journal]. - 2023. - №8 (134).- URL:<https://research-journal.org/archive/8-134-2023-august/10.23670/IRJ.2023.134.38> (accessed: 24.04.2024). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.134.38
7. Sosth`ene P.-M. Ung, Chao-Jun Li. From rocks to bioactive compounds: a journey through the global P(v) organophosphorus industry and its sustainability. *RSC Sustainability*, 2023, 1, 11–37 | 31. <https://doi.org/10.1039/d2su00015f>.



8. Carly Cassella. The World Could Soon Run Out of a Crucial Resource And Nobody Is Talking About I Environ. Sci. Technol. 2019, 53, 8479–848
9. Powers S. M., et al. / Global Opportunities to Increase Agricultural Independence Through Phosphorus Recycling // Earth's Future. Volume7, Issue4. April 2019. Pages 370-383.
10. Martin Blackwell, Tegan Darch, Richard Haslam / Phosphorus use efficiency and fertilizers: future opportunities for improvements // Front. Agr. Sci. Eng. 2019, 6(4): 332–340. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019274>.
11. Kwesi Asomaning, Samuel. 2020. 'Processes and Factors Affecting Phosphorus Sorption in Soils'. Sorption in 2020s. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.90719. DOI: 10.5772/intechopen.90719.
12. Гриффит Э., Битон А., Спепсер Дж., Митчелл Д. Фосфор в окружающей среде. — М.: Мир, 1977. — 218 с.
13. Adnan, Muhammad & Xiao, Baohua & Ubaid Ali, Muhammad & Peiwen, Xiao & Zhao, Peng & Wang, Haiyan & Bibi, Shaheen. (2024). Heavy metals pollution from smelting activities: A threat to soil and groundwater. Ecotoxicology and Environmental Safety. 274. 116189. 10.1016/j.ecoenv.2024.116189.
14. Khater, Ashraf. (2008). Uranium and heavy metals in Phosphate Fertilizers. J. Uranium, Mining and Hydrogeology. DOI.10.1007/978-3-540-87746-2_26.

