

ISSN 1561-8331 (Print)  
ISSN 2524-2342 (Online)  
УДК 669.334.1  
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-3-246-253>

Поступила в редакцию 04.05.2023  
Received 04.05.2023

Д. Рамазонава<sup>1</sup>, З. Тураев<sup>3</sup>, А. Шамишова<sup>2</sup>, Д. Абсатторов<sup>1</sup>, И. Усманов<sup>1</sup>, М. Самадий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Янгийерский филиал Ташкентского химико-технологического института, Янгийер, Узбекистан

<sup>2</sup>Термезский институт агротехнологий и инновационного развития, Термез, Узбекистан

<sup>3</sup>Наманганский инженерно-строительный институт, Наманган, Узбекистан

## ТРАНСФОРМАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ В УСЛОВИЯХ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОЖНЫХ УДОБРЕНИЙ

**Аннотация.** Приведены результаты исследований по изучению поведения микроэлемента меди в условиях производства сложных азотно-фосфорных удобрений – аммофоса и нитроаммофоса. Показано, что при введении оксида и сульфата меди в растворы фосфорной и смеси азотной и фосфорной кислот медь находится в виде дигидрофосфата. В интервале pH 1,6–2 в осадок выпадает гидрофосфат меди, а при pH выше 6 образуется медьаммонийфосфат. При аммонизации смеси азотной и фосфорной кислот, содержащей медь, гидрофосфат меди образуется в интервале pH 1,2–4,1, а при pH выше 5,2 в осадок выпадает медьаммонийфосфат. В условиях получения медьсодержащего аммофоса медь находится в виде смеси гидрофосфата и медьаммонийфосфата, в условиях получения нитроаммофоса – в виде гидрофосфата с высоким содержанием медьаммонийфосфата. И в аммофосе и в нитроаммофосе медь находится в усвояемой растениями форме, что указывает на возможность введения микроэлемента меди на различных стадиях получения сложных фосфорсодержащих удобрений.

**Ключевые слова:** фосфорная кислота, азотная кислота, аммиак, дигидрофосфат, гидрофосфат меди, медьаммонийфосфат

**Для цитирования.** Поведение меди в условиях получения сложных удобрений / Д. Рамазонава, З. Тураев, А. Шамишова [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя хімічных навук. – 2025. – Т. 61, № 3. – С. 246–253. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-3-246-253>

D. Ramazanova<sup>1</sup>, Z. Turaev<sup>3</sup>, A. Shamishova<sup>2</sup>, D. Absattorov<sup>1</sup>, I. Usmanov<sup>1</sup>, M. Samadiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yangier branch of Tashkent Institute of Chemical Technology, Yangiyer, Uzbekistan

<sup>2</sup>Termez Institute of Agricultural Technologies and Innovative Development, Termez, Uzbekistan

<sup>3</sup>Namangan Institute of Civil Engineering, Namangan, Uzbekistan

## TRANSFORMATION OF COPPER COMPOUNDS IN THE CONDITIONS OF OBTAINING COMPLEX FERTILIZERS

**Abstract.** The results of studies on the behavior of the copper trace element in the production of complex nitrogen-phosphorus fertilizers – ammophos and nitroammophos are presented. It is shown that, when copper oxide and sulfate are introduced into solutions of phosphoric and mixtures of nitric and phosphoric acids, copper appears in the form of dihydrophosphate. Copper hydrophosphate precipitates in the pH range of 1.6–2, and at a pH above 6 copper ammonium phosphate is formed. During ammonization of a mixture of nitric and phosphoric acids containing copper, copper hydrophosphate is formed in the pH range of 1.2–4.1, and at a pH above 5.2, copper ammonium phosphate precipitates. Under the conditions for obtaining copper-containing ammophos, copper is in the form of a mixture of hydrophosphate and copper ammonium phosphate. Under the conditions for obtaining nitroammophos, copper is mainly in the form of hydrophosphate with a lethal content of copper ammonium phosphate. Both in ammophos and in nitroammophos, copper is in a form assimilated by plants, which indicates the possibility of introducing the microelement copper at various stages of obtaining complex phosphorus-containing fertilizers.

**Key words:** phosphoric acid, nitric acid, ammonia, dihydrophosphate, copper hydrophosphate, copper ammonium phosphate

**For citation.** Ramazanova D., Turaev Z., Shamishova A., Absattorov D., Usmanov I., Samadiy M. Transformation of copper compounds in the conditions of obtaining complex fertilizers. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya khimichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2025, vol. 61, no. 3, pp. 246–253 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2025-61-3-246-253>

**Введение.** Для нормального роста и развития растений необходимы различные элементы питания – макро- и микроэлементы. По современным данным, таких элементов порядка 70, без которых растения не могут полностью завершить цикл развития и которые не могут быть заменены другими [1, 2].

Отечественными и зарубежными учеными доказано, что нет ни одного важного биохимического процесса, ни одной физиологической функции в живом организме и растении, которые были бы осуществлены вне участия того или иного микроэлемента [3].

В настоящее время наиболее изучена физиологическая и биохимическая роль цинка, меди, молибдена, марганца, бора, кобальта, для которых достаточно четко установлено значение в метаболизме растений, прямое или косвенное участие в синтетических процессах клетки, а также в росте и развитии организмов. Для этих микроэлементов изучен механизм действия на биологические процессы, углеводный обмен, окислительно-восстановительные реакции и фосфорилирования.

Микроэлементы, будучи составной частью ферментов или их активаторами, имеют исключительное значение в нуклеиновом обмене и биосинтезе белков, оказывают большое влияние на скорость и энергию обмена веществ различных соединений растительной клетки, выполняют важную физиолого-биологическую роль в метаболизме растительного организма, участвуют в синтетических процессах клетки и, следовательно, в росте и развитии растений, а также определяют скорость и направленность реакций в организме. При их недостатке нарушается синтез органических соединений фосфора и азота, снижаются скорость и направленность основных процессов обмена в растительной клетке.

В жизнедеятельности растений каждый микроэлемент выполняет определенную функцию. В частности, медь (Cu) и молибден (Mo) участвуют в окислительно-восстановительных реакциях, связанных с дыханием растений, фотосинтезом, азотным и фосфорным обменом, а также в биосинтезе аминокислот, хлорофилла и фиксации молекулярного азота. При недостатке меди в питании растений снижается активность ферментов, нарушается нормальное образование хлорофилла, нуклеиновых кислот, биосинтез белков, вследствие чего уменьшается продуктивность растений.

Микроэлементы (медь (Cu), марганец (Mn), железо (Fe) и цинк (Zn)) необходимы растениям, их функции тесно связаны с жизненно важным метаболизмом. Нормальный диапазон концентраций каждого из этих металлов в растении узок, при этом как недостаток, так и избыток вызывает серьезные физиологические последствия [4].

Микроэлементы не могут заменить основные питательные элементы минеральных удобрений, а лишь дополняют их действие. Вместе с тем практика сельскохозяйственного производства свидетельствует о том, что ни один из микроэлементов не может быть заменен другим. Растения значительно эффективней используют азотные, фосфорные и калийные удобрения при достаточном содержании в почве микроэлементов. При их недостатке сельскохозяйственные культуры дают неполноценный урожай, а растения подвергаются различным заболеваниям.

В состав ферментов, витаминов, гормонов, пигментов и иных соединений, влияющих на жизненные процессы, входят 14 микроэлементов (B, Mn, Cu, Zn, Co, Mo и др.).

Микроэлементы играют важную роль в обмене веществ непосредственно или в составе биокатализаторов и других физиологически активных веществ, участвуют почти во всех основных биохимических реакциях, протекающих в растительных организмах [5–12].

Действие каждого микроэлемента в окислительно-восстановительных процессах является специфичным. Медь участвует в фотосинтезе углеводов и образовании белковых веществ и витаминов. При недостатке меди деятельность окислительных ферментов резко ослабляется, что тормозит развитие, ведет к увяданию. Появление на листьях белых пятен – признак крайнего недостатка меди. Однако ее избыток оказывает на растения угнетающее воздействие, поэтому вносить соли, содержащие медь, надо осторожно и в очень малых дозах [13].

Медь (Cu) является важным элементом, регулирующим здоровье основных организмов, таких как растения, животные и люди. В последнее время большое внимание привлекают экологически безопасные методы решения проблем, поскольку они просты и жизнеспособны, являются альтернативой многочисленным физическим и химическим методам. Агротехники на основе меди традиционно использовались в сельском хозяйстве для поддержания состояния питания и здоровья растений [14].

Потребность в микроэлементах особенно возрастает, когда технологии выращивания культур «набирают обороты», повышаются как нормы внесения NPK-удобрений (с переходом на безбал-

ластные), так и генетический потенциал сортов. При этом растения все хуже откликаются на внесение только NPK.

Эффективное управление удобрениями имеет большое значение для устойчивого ведения сельского хозяйства. Одним из способов улучшения агрономических методов является использование удобрений с медленным высвобождением (SRF), которые показали интересную роль в оптимизации доступности питательных веществ для роста растений. Выделение азота, фосфора и калия профили NPK-удобрений с покрытием определяли в воде и почве [15, 16].

При добавлении микроэлементов в состав удобрений между ними может произойти химическое взаимодействие, приводящее к изменению некоторых технологических параметров процесса и переводу в неусвояемые формы питательных элементов, вводимых добавок, также могут изменяться физико-химические, товарные и другие свойства.

Применение фосфорных удобрений может быть значительным источником потенциально опасных микроэлементов. При обычной практике земледелия влияние внесения фосфорных удобрений на накопление микроэлементов в принимающих почвах было ограниченным и локализованным. Их поглощение растениями сильно варьировалось в зависимости от норм внесения удобрений, характеристик почвы и растений [17].

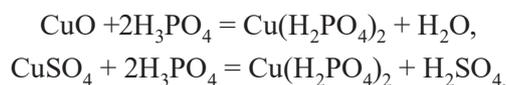
Для решения проблемы производства высокоэффективных комплексных удобрений необходимы глубокие физико-химические исследования взаимодействия микроэлементов с компонентами удобрений в процессе их получения, хранения и механизма влияния добавок на свойства получаемых продуктов. В то же время чистые соли микроэлементов дефицитны и дороги, что увеличивает себестоимость продукта.

В связи с этим изучение возможности использования дешевых микроэлементов, содержащих промышленные отходы, и поведение микроэлементов в процессе производства являются актуальной проблемой.

**Объекты и методы исследований.** Объектами исследований являются соединения, образующиеся при аммонизации фосфорнокислых и нитратно-фосфатных растворов, которые содержат в своем составе такой микроэлемент, как медь. В статье представлены результаты исследований по извлечению меди из пыли кислородно-факельной печи. Для работы использовали пыль состава (мас.%): Cu – 18,0; Fe – 17,1; C – 11,4; SiO – 2,4; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1,5; CaO – 1,2; MgO – 0,3. Медь в составе пыли находилась в основном в виде сульфата и оксида. Химический анализ растворов проводили по известным методикам [18–20].

**Результаты и их обсуждение.** В основе процессов получения сложных азотно-фосфорных удобрений, содержащих микроэлементы, лежат реакции взаимодействия различных солей микроэлементов с азотной и ортофосфорной кислотами и их солями, в результате которых могут образовываться различные соединения, имеющие различную растворимость. Данное исследование посвящено изучению поведения меди в условиях получения сложных азотно-фосфорных удобрений – аммофоса и нитроаммофоса при аммонизации фосфорной кислоты и смеси азотной и фосфорной кислот.

При введении оксида и сульфата меди в термическую фосфорную кислоту протекают реакции с образованием дигидрофосфата меди:



При нейтрализации полученного раствора газообразным аммиаком до pH 1,6 изменение фазового состава раствора не происходило.

При pH 1,6–2 наблюдалось образование твердой фазы нежно-голубого цвета. Химический анализ твердой фазы, полученной при pH 1,6–2, показал отсутствие азота и наличие 35,5–36,2 % Cu<sup>2+</sup> и 54,0–54,5 % HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, что теоретически соответствует соединению CuHPO<sub>4</sub> (теоретический состав: Cu<sup>2+</sup> – 35,8 %, HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 54,1 %). Результаты химического анализа приведены в табл. 1 и 2.

Процесс, происходящий при нейтрализации медьсодержащего фосфорнокислого раствора газообразным аммиаком в интервале pH 1,6–2, можно описать следующим уравнением:



Таблица 1. Результаты химического анализа твердой фазы, образующейся при аммонизации фосфорной кислоты, содержащей оксид меди

Table 1. The results of the chemical analysis of the solid phase formed during the ammonization of phosphoric acid containing copper oxide

рН пульпы	НРО <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , %	Сu <sup>2+</sup> , %	НН <sub>3</sub> , %	Мольное соотношение НРО <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : СuO : НН <sub>3</sub>	Твердая фаза
1,6	54,3	35,9		1 : 1,00	[CuHPO <sub>4</sub> ]
1,8	54,0	35,5		1 : 0,99	
2,0	54,5	36,2		1 : 0,99	
2,5	54,0	36,9	2,1	1 : 1,03 : 0,22	[CuHPO <sub>4</sub> ] + [Cu(NH <sub>4</sub> )PO <sub>4</sub> ]
4,3	52,2	35,7	3,4	1 : 1,03 : 0,37	
5,4	51,6	33,6	4,1	1 : 0,98 : 0,45	
6,0	50,2	33,2	6,2	1 : 1,00 : 0,70	[Cu(NH <sub>4</sub> )PO <sub>4</sub> ]
6,3	49,0	32,1	9,0	1 : 0,99 : 1,03	
6,8	49,5	32,0	8,8	1 : 0,98 : 1,00	
7,0	48,7	31,8	8,9	1 : 0,99 : 1,03	

Таблица 2. Результаты химического анализа твердой фазы, образующейся при аммонизации фосфорной кислоты, содержащей сульфат меди

Table 2. The results of the chemical analysis of the solid phase formed during the ammonization of phosphoric acid containing copper sulfate

рН пульпы	НРО <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , %	Сu <sup>2+</sup> , %	НН <sub>3</sub> , %	Мольное соотношение НРО <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : СuO : НН <sub>3</sub>	Твердая фаза
1,7	54,5	35,4		1 : 0,98	[CuHPO <sub>4</sub> ]
2,0	54,1	35,7		1 : 1,00	
2,7	53,8	35,5	2,8	1 : 1,00 : 0,29	[CuHPO <sub>4</sub> ] + [Cu(NH <sub>4</sub> )PO <sub>4</sub> ]
4,0	52,0	35,1	3,2	1 : 1,02 : 0,35	
4,5	51,2	34,7	3,9	1 : 1,02 : 0,43	
5,8	50,05	33,2	6,0	1 : 0,99 : 0,67	[Cu(NH <sub>4</sub> )PO <sub>4</sub> ]
6,3	49,8	32,5	9,0	1 : 0,98 : 1,02	
6,7	49,3	32,5	8,7	1 : 1,00 : 1,00	
7,1	49,6	32,0	8,9	1 : 0,98 : 1,01	

В диапазоне рН 2,5–6,0 химический анализ показал наряду с Сu<sup>2+</sup> и НРО<sub>4</sub><sup>2-</sup> также наличие 2,1–6,2 % НН<sub>3</sub>, что указывает на совместное осаждение двух солей: гидрофосфата меди и медьаммонийфосфата:



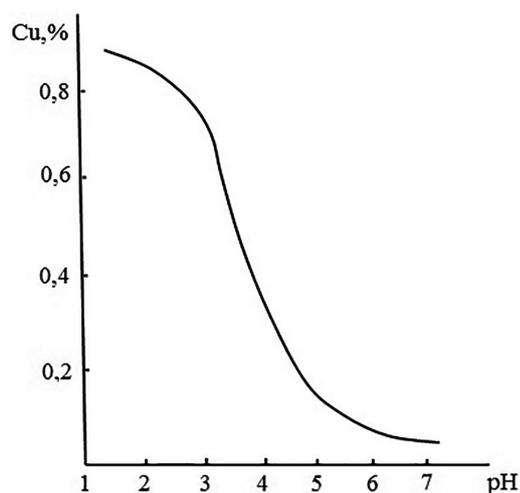
При дальнейшей нейтрализации медьсодержащего фосфорнокислого раствора осадок приобрел интенсивно-голубую окраску. Химический анализ осадка показал следующее содержание в ней компонентов (мас.%): НРО<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 48,7–49,0, Сu<sup>2+</sup> – 31,8–32,1, НН<sub>3</sub> – 8,8–9,0. В мольном соотношении это выразилось 1 : 1 : 1.

Уравнение реакции, протекающей при рН выше 6,0, можно представить в следующем виде:



На рисунке изображена кривая зависимости концентрации меди в составе жидкой фазы при аммонизации фосфорной кислоты, содержащей 1 % меди. Данные рисунка подтверждают тот факт, что при рН 1,6–2 происходит осаждение гидрофосфата меди, при рН 2,5–6 – гидрофосфата и аммоний-медь-фосфата. Диапазон рН 6,5–7,5 способствует образованию аммоний-медь-фосфата [21].

Производство нитроаммофоса ведется по непрерывной схеме путем нейтрализации газобразным аммиаком нитратно-фосфатных растворов с последующей упаркой их в выпарной батарее, грануляцией и сушкой упаренной пульпы в барабанном грануляторе-сушилке (БГС).

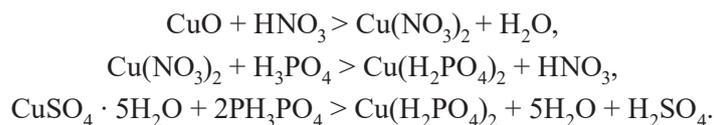


Влияние pH на концентрацию меди в жидкой фазе аммонизированной фосфорной кислоты

The influence of pH on the concentration of copper in the liquid phase of ammoniated phosphoric acid

Микроэлементсодержащие удобрения могут быть получены путем введения микроэлемента на начальной или промежуточной стадии производства азотно-фосфорного удобрения. В зависимости от кислотной среды, аниона кислоты, концентрации микроэлемента, места введения добавки возможно существование различных форм микроэлементов. В связи с этим изучено поведение меди как микроэлемента в нитратно-фосфатном растворе (НФР) в зависимости от pH среды. Для этого в реакционный сосуд вводили расчетное количество нитратно-фосфатного раствора с соотношением N : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 0,36 оксида или сульфата меди. Содержимое реакционной колбы перемешивали до растворения вводимой добавки в нитратно-фосфатном растворе и выдерживали в термостате с работающей мешалкой в течение 15–20 мин. Затем смесь нейтрализовали газообразным аммиаком до появления первых кристаллов или заданного значения pH.

При растворении оксида и сульфата меди в НФР протекают реакции с образованием дигидрофасфата меди по уравнениям:



При нейтрализации полученного раствора газообразным аммиаком до pH 1,2 образования осадка не наблюдается. При дальнейшей аммонизации до pH 4,1 выпадает осадок нежно-голубого цвета. Химический анализ твердой фазы показал следующее содержание компонентов: Cu – 35,99–35,31 %; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 41,13–40,71 %, что теоретически соответствует их содержанию в CuHPO<sub>4</sub>.

В интервале pH 4,1–7,0 химический анализ показал наряду с медью и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> наличие 1,50–2,14 % аммиачного азота, что указывает на совместное осаждение двух солей гидрофосфата меди и медьаммонийфосфата (табл. 3):

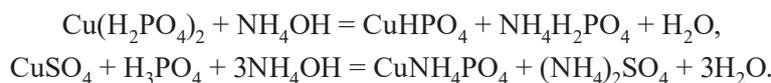


Таблица 3. Химический состав твердой фазы, образующейся при аммонизации медьсодержащих нитратно-фосфатных растворов

Table 3. The chemical composition of the solid phase formed during the ammonization of copper-containing nitrate-phosphate solutions

pH	Cu, %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	N, %	Мольные соотношения Cu : P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : N	Твердая фаза
1,2	35,99	41,13	–	1 : 1,0241 : –	[CuHPO <sub>4</sub> ]
2,6	35,71	40,94	–	1 : 1,0260 : –	
3,1	35,90	40,86	–	1 : 1,0301 : –	
4,1	35,31	40,71	–	1 : 1,0318 : –	
5,2	31,6	37,87	1,50	1 : 1,0726 : 0,2729	[CuHPO <sub>4</sub> ] + [Cu(NH <sub>4</sub> )PO <sub>4</sub> ]
5,4	31,7	37,17	1,99	1 : 1,0498 : 0,2848	
6,2	31,2	37,65	1,99	1 : 1,0758 : 0,2894	
7,0	30,3	37,13	2,14	1 : 1,0966 : 0,3206	

**Заклучение.** Проведенные исследования поведения микроэлемента меди в виде оксида и сульфата в условиях получения аммофоса и нитроаммофоса показали возможность введения соединенной меди в процесс производства микроудобрений. В составе аммофоса при pH 4,5–5 медь находится в виде смеси гидрофосфата и медьаммонийфосфата. При введении оксида и сульфата меди в состав нитроаммофоса медь также присутствует в форме гидрофосфата и медьаммонийфосфата. При производстве аммофоса и нитроаммофоса медь вводится в состав смеси в виде оксида или сульфата и находится в легко усвояемой растениями, медленно растворимой форме.

#### Список использованных источников

1. G'afurov, Q. Mineral o'g'itlar va tuzlar texnologiyasi / Q. G'afurov, I. Shamshidinov. – Toshkent: Fan va texnologiya, 2007. – 352 p.
2. G'afurov, Q. Mineral o'g'it ishlab chiqarish nazariyasi va texnologik hisoblari / Q. G'afurov, I. Shamshidinov. – Toshkent: Fan va texnologiya, 2010. – 360 p.
3. Результаты исследования подвижности микроэлементов в почвенных горизонтах под действием гумусовых и карбоновых кислот / О. Ю. Дроздова, Ю. В. Алехин, С. М. Ильина [и др.] // Вестник отделения наук о Земле РАН. – 2011. – Т. 3, № NZ6026. – С. 1–6.
4. Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese / S. Rai, P. K. Singh, S. Mankotia // Plant Stress. – 2021. – Vol. 1. – P. 100008.
5. Продуктивность томата при применении микроэлементов и биологически активных веществ / М. В. Селиванова, Е. С. Романенко, Е. А. Сосюра [и др.] // Овощи России. – М.: Федер. науч. центр овощеводства (ВНИИССОК), 2017. – С. 91–95.
6. Рахмонов, Р. Метаболизм органических кислот листьев хлопчатника / Р. Рахмонов, Н. Губанова, О. Джураев // Влияние внутренних и внешних факторов на физиологические и биохимические процессы хлопчатника. – Ташкент: ФАН, 1981. – С. 57–62.
7. Микроэлементный состав листьев и стеблей герани (*Pelargonium roseum*) / И. А. Юсупова [и др.] // Эффективное использование биохимических факторов при выращивании сельскохозяйственных культур на пахотных землях: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Душанбе, 2012. – С. 130–131.
8. Якубова, М. М. Изменение интенсивности биосинтеза пигментов в онтогенезе хлопчатника / М. М. Якубова // Труды 1-й конференции биохимиков Средней Азии и Казахстана. – Ташкент, 1967. – С. 99–100.
9. Донорно-акцепторные системы у различающихся по продуктивности сортов хлопчатника / М. М. Якубова, Х. Ю. Юлдашев, З. М. Хамрабаева [и др.] // Вестник Таджикского национального университета. – 2011. – № 1 (65). – С. 90–95.
10. Адаптационные механизмы фотосинтетического аппарата у сортов и линий хлопчатника / Х. Ю. Юлдашев, Х. Н. Хамидов, М. М. Якубова, Т. Д. Гиясов // Известия академии наук Республики Таджикистан. Отделение биологических и медицинских наук. – 2011. – № 3. – С. 76–84.
11. Розметов, К. С. Интенсивные приемы возделывания хлопчатника в условиях луговых почв нижнего течения Аму-Дарьи / К. С. Розметов // Молодой ученый. – 2011. – № 3. – URL: <https://moluch.ru/archive/26/2823/> (дата обращения 22.04.2023)
12. Шеуджен, А. Х. Физиологическая роль микроэлементов в растениях / А. Х. Шеуджен, Х. Д. Хурум, Т. Н. Бондарева // Удобрение и урожай: материалы регион. науч.-практ. конф. (Краснодар, 8–10 дек. 2004 г.); под ред. проф. А. Х. Шеуджена. – Майкоп: ГУРИПП «Адыгея», 2005. – С. 30–64.
13. Metabolomics combined with physiology and transcriptomics reveals how *Citrus grandis* leaves cope with copper-toxicity / H.-Y. Huang, Q.-Q. Ren, Y.-H. Lai [et al.] // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2021. – Vol. 223. – P. 112579. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112579>
14. Antimicrobial activity of copper nanomaterials: Current status and future perspectives / V. Bhuvaneshwari, N. K. Ramasamy, S. I. Kumar [et al.] // Copper Nanostructures: Next-Generation of Agrochemicals for Sustainable Agroecosystems. Nanobiotechnology for Plant Protection / ed. Kamel A. Abd-Elsalam. – Elsevier Inc., 2022. – P. 453–475. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823833-2.00024-6>
15. Cellulose nanocrystals-filled poly (vinyl alcohol) nanocomposites as waterborne coating materials of NPK fertilizer with slow release and water retention properties / I. Kassem, E.-H. Ablouh, F.-Z. El Bouchtaoui [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. – 2021. – Vol. 189. – P. 1029–1042. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.093>
16. Research of The Reasons for Decreasing the Degree of Desliming of The Sylvinitic Ore of the Tyubegatan Deposit / M. Samadiy, J. Makhmayorov, B. Abdullayev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1111, № 1. – P. 012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1111/1/012058>
17. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review / W. Jiao, W. Chen, A. C. Chang, A. L. Page // Environmental Pollution. – 2012. – Vol. 168. – P. 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.03.05>
18. Liu, Z. Metallurgical process for valuable elements recovery from red mud: A review / Z. Liu, H. Li // Hydrometallurgy. – 2015. – Vol. 155. – P. 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.03.018>
19. Ревенко, А. Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов / А. Г. Ревенко. – Новосибирск: Наука, 1994. – 264 с.

20. Мазалов, Л. Н. Рентгеновские спектры и химическая связь / Л. Н. Мазалов. – Новосибирск: Наука, 1982. – 111 с.
21. Тураев, З. Получение медь- и цинксодержащего аммофоса с использованием некоторых видов вторичного сырья цветной металлургии и отработанных катализаторов / З. Тураев, И. Т. Шамшидинов, И. И. Усманов // Актуальные проблемы развития химической науки и промышленности: сб. тр. I Узбекско-Казахского симп. – Ташкент, 2019. – С. 147–152.

## References

- Gafurov Q., Shamshidinov I. *Technology of mineral fertilizers and salts*. Tashkent, Fan va texnologiya, 2007. 352 p. (in Uzbek).
- Gafurov Q., Shamshidinov I. *Theory and technological calculations of mineral fertilizer production*. Tashkent, Fan va texnologiya, 2010. 360 p. (in Uzbek).
- Drozdova, O. Yu., Alekhine Yu. V., Ilyina S. M., Lapitsky S. A., Sokolova M. N. Results of the study of the mobility of microelements in soil horizons under the influence of humic and carboxylic acids. *Bulletin of the Earth Sciences Department of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 3, no. NZ6026, p. 1–6 (in Russian).
- Rai S., Singh P. K., Mankotia S., Swain J., Satbhai S. B. Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese. *Plant Stress*, 2021, vol. 1, pp. 100008. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100008>
- Selivanova M. V., Romanenko E. S., Sosyura E. A., Esaulko N. A., Aisanov T. S. Productivity of tomato with the use of microelements and biologically active substances. *Vegetables of Russia*. Moscow, Publishing House of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Center for Vegetable Growing” (VNIISOK), 2017, pp. 91–95 (in Russian).
- Rakhmonov R., Gubanova N., Juraev O. Metabolism of organic acids in cotton leaves. *Vliyaniye vnutrennikh ivneshnikh faktorov na fiziologicheskiye i biokhimicheskiye protsessy khlopatnika* [In the collection of articles. Influence of internal and external factors on the physiological and biochemical processes of cotton]. Tashkent, FAN, 1981, pp. 57–62 (in Russian).
- Yusupova I. A. et al. Microelement composition of leaves and stems of geranium (*Pelargonium roseum*). *Effektivnoye ispol'zovaniye biokhimicheskikh faktorov pri vyrashchivanii sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na pakhotnykh zemlyakh. Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Effective use of biochemical factors in the cultivation of crops on arable land. Materials of the international scientific and practical conference]. Dushanbe, 2012, pp. 130–131 (in Russian).
- Yakubova M. M. Changes in the intensity of pigment biosynthesis in cotton ontogeny. *Trudy konerenai biokhimikov Sredney Azii i Kazakhstana* [Proceedings of the 1st Conference biochemists of Central Asia and Kazakhstan]. Tashkent, 1967, pp. 99–100 (in Russian).
- Yakubova M. M., Yuldoshev Kh. Yu., Khamrabaeva Z. M., Ibragimova S. I., Khamidov H. N. Donor-acceptor systems in cotton varieties with different productivity. *Bulletin of the Tajik National University*, 2011, vol. 1, pp. 90–95 (in Russian).
- Yakubova M. M., Yuldashev H. Adaptation mechanisms of the photosynthetic apparatus in varieties and lines of cotton. *News of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Department of Biological Sciences*, 2011, no. 3, pp. 76–84 (in Russian).
- Rozmetov K. S. Intensive methods of cotton cultivation in the conditions of meadow soils of the lower reaches of the Amu-Darya. *Young scientist*, 2011, no. 3. Available at: <https://moluch.ru/archive/26/2823/> (accessed 28 April 2025) (in Russian).
- Sheudzhen A. Kh., Hurum H. D., Bondareva T. N. Physiological role of trace elements in plants. *Udobrenie i urozhaj. Materialy regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Fertilizer and harvest: Materials of the regional scientific and practical conference]. Maykop, GURIPP “Adygea”, 2005, pp. 30–64 (in Russian).
- Huang H.-Y., Ren Q.-Q., Lai Y.-H., Peng M.-Y., Zhang J., Yang L.-T., Chen L.-S. Metabolomics combined with physiology and transcriptomics reveals how *Citrus grandis* leaves cope with copper-toxicity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 223, pp. 112579. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112579>
- Bhuvaneshwaria V., Ramasamy Kumar N., Idhaya Kumar S., Kalaivani S., Vaidehi D., Karthik Kumar D. Antimicrobial activity of copper nanomaterials: Current status and future perspectives. Kamel A. Abd-El Salam (ed.). *Copper Nanostructures: Next-Generation of Agrochemicals for Sustainable Agroecosystems. Nanobiotechnology for Plant Protection*. Elsevier Inc., 2022, pp. 453–475. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823833-2.00024-6>
- Kassem I., Ablouh E.-H., El Bouchaoui F.-Z., Kassab Z., Khouloud M., Sehaqui H. [et al.]. Cellulose nanocrystals-filled poly (vinyl alcohol) nanocomposites as waterborne coating materials of NPK fertilizer with slow release and water retention properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, vol. 189, pp. 1029–1042. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.093>
- Samadiy M., Makhmayorov J., Abdullayev B., Rakhimkulov S., Usmanov I. Research of The Reasons for Decreasing the Degree of Desliming of The Sylvinit Ore of the Tyubegatan Deposit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1111, no. 1, pp. 012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1111/1/012058>
- Jiao W., Chen W., Chang A. C., & Page A. L. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review. *Environmental Pollution*, 2012, vol. 168, pp. 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.03.05>
- Liu Z., Li H. Metallurgical process for valuable elements recovery from red mud: A review. *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 155, pp. 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.03.018>
- Revenko A. G. *X-ray spectral fluorescence analysis of natural materials*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1994. 264 p. (in Russian)
- Mazalov L. N. *X-ray spectra and chemical bond*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1982. 111 p. (in Russian).
- Turaev Z., Shamshidinov I. T., Usmanov I. I. Obtaining copper- and zinc-containing ammophos using some types of secondary raw materials of non-ferrous metallurgy and spent catalysts. *Aktual'nyye problemy razvitiya khimicheskoy nauki i promyshlennosti. Sbornik trudov I Uzbeksko-Kazakhskogo Simpoziuma* [Actual problems of the development of chemical science and industry. Proceedings of the I Uzbek-Kazakh Symposium], Tashkent, 2019, pp. 147–152 (in Russian).

### Информация об авторах

*Рамазанова Дилбар Илёс кизи* – студент. Янгийерский филиал Ташкентского химико-технологического института (ул. Тинчлик, 1, 121000, Янгийер, Сирдаря, Республика Узбекистан). E-mail: [dinaramazonova126@gmail.com](mailto:dinaramazonova126@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-0232-0185>

*Тураев Зокиржон* – профессор. Наманганский инженерно-строительный институт (ул. И. Каримова, 12, 160103, Наманган, Республика Узбекистан). E-mail: [T-Zokirjon@umail.uz](mailto:T-Zokirjon@umail.uz); <https://orcid.org/0009-0000-2326-3020>

*Шамишова Айшолпан Тажетдиновна* – ассистент. Термезский институт агротехнологий и инновационного развития (ул. Янгиабад, 12, 191200, Сурхандарьёйская область, Термез, Республика Узбекистан). E-mail: [a.shamishova@inbox.ru](mailto:a.shamishova@inbox.ru); <https://orcid.org/0009-0009-7417-9465>

*Абсатторов Диёрбек Сохижон угли* – студент. Янгийерский филиал Ташкентского химико-технологического института (ул. Тинчлик, 1, 121000, Янгийер, Сирдаря Республика Узбекистан). E-mail: [absattorov111@gmail.com](mailto:absattorov111@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-6320-8250>

*Усманов Илхам Икрамович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры. Янгийерский филиал Ташкентского химико-технологического института (ул. Тинчлик, 1, 121000, Янгийер, Сирдаря, Республика Узбекистан). E-mail: [ilkham\\_usmanov@inbox.ru](mailto:ilkham_usmanov@inbox.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4711-8183>

*Самадий Муроджон Абдусалимзода* – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора. Янгийерский филиал Ташкентского химико-технологического института (ул. Тинчлик, 1, 121000, Янгийер, Сирдаря, Республика Узбекистан). E-mail: [samadiy@inbox.ru](mailto:samadiy@inbox.ru); <https://orcid.org/0000-0003-4467-291X>

### Information about the authors

*Ramazonova Dilbar* – Student. Yangiyer branch of the Tashkent Chemical Technological Institute (1, Tinchlik Str., 121000, Yangiyer, Sirdarya, Republic of Uzbekistan). E-mail: [dinaramazonova126@gmail.com](mailto:dinaramazonova126@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-0232-0185>

*Turaev Zokirjon* – Professor. Namangan Civil Engineering Institute (12, I. Karimov Str., 160103, Namangan, Republic of Uzbekistan). E-mail: [T-Zokirjon@umail.uz](mailto:T-Zokirjon@umail.uz); <https://orcid.org/0009-0000-2326-3020>

*Shamishova Aisholpan* – Assistant. Termez Institute of Agrotechnologies and Innovative Development (12, Yangiabad Str., 191200, Surkhandarya region, Termez, Republic of Uzbekistan). E-mail: [a.shamishova@inbox.ru](mailto:a.shamishova@inbox.ru); <https://orcid.org/0009-0009-7417-9465>

*Absattorov Diyorbek* – Student. Yangiyer branch of the Tashkent Chemical Technological Institute (1, Tinchlik Str., 121000, Yangiyer, Sirdarya, Republic of Uzbekistan). E-mail: [absattorov111@gmail.com](mailto:absattorov111@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-6320-8250>

*Usmanov Ilkham* – D. Sc. (Technical), Professor, Professor of the Department. Yangiyer branch of the Tashkent Chemical Technological Institute (1, Tinchlik Str., 121000, Yangiyer, Sirdarya, Republic of Uzbekistan). E-mail: [ilkham\\_usmanov@inbox.ru](mailto:ilkham_usmanov@inbox.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4711-8183>

*Samadiy Murodjon* – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Deputy Director. Yangiyer branch of the Tashkent Chemical Technological Institute (1, Tinchlik Str., 121000, Yangiyer, Sirdarya, Republic of Uzbekistan). E-mail: [samadiy@inbox.ru](mailto:samadiy@inbox.ru); <https://orcid.org/0000-0003-4467-291X>