

Применение аминокислот и их хелатных комплексов с микроэлементами в питании растений (обзор)

© 2022. Д. В. Петухов¹, м. н. с., Е. С. Измestьев^{1,2}, к. х. н., доцент, с. н. с.,
 А. В. Сазанов¹, к. б. н., руководитель центра компетенций, доцент,
 М. А. Зайцев¹, к. п. н., зав. кафедрой, доцент,
 Е. В. Товстик¹, к. б. н., с. н. с., доцент,
¹Вятский государственный университет,
 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
 167000, Россия, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 48,
 e-mail: usr20941@vyatsu.ru

В последнее десятилетие применение хелатных комплексов с микроэлементами в качестве удобрений приобретает всё большую популярность в сельском хозяйстве. Преимущество их использования заключается в том, что они способны предотвращать протекание нежелательных процессов, которые могут происходить в почве или на поверхности листьев растений и приводить к уменьшению растворимости соединений металлов, снижая их биодоступность.

В производстве хелатов используются такие комплексообразователи, как ионы цинка, железа(II), меди(II), марганца(II), молибдена(VI), кобальта(II). В качестве хелатирующих агентов широкое применение нашли синтетические органические соединения, такие как этилендиаминтетрауксусная, диэтилентриаминпентауксусная, этидроновая кислоты или их натриевые и калиевые соли. Несмотря на важную роль в доставке необходимых элементов растениям, у них есть существенный недостаток: при контакте таких хелатных комплексов с растительной клеткой микроэлемент попадает внутрь без хелатора. Разложение происходит абиотически и протекает очень медленно, вследствие чего хелаторы накапливаются в почве, загрязняя её.

Интерес к экологической безопасности удобрений стимулирует исследования по поиску и применению альтернативных хелатирующих агентов для включения их в состав хелатных комплексов с микроэлементами. В качестве перспективных кандидатов в настоящее время рассматриваются такие биоразлагаемые природные органические соединения как лигносульфонаты, гуматы, фульваты, а также аминокислоты и низкомолекулярные пептиды, полученные гидролизом белков. За счёт эффективной адсорбции достигается высокая биодоступность хелатного комплекса, при этом появляется возможность снизить вносимую дозу удобрения на его основе. Экзогенные L-аминокислоты в составе комплексов могут «распознаваться» растительными клетками, проникать внутрь их и включаться в метаболические пути растения. Также опыт применения удобрений на основе хелатных комплексов аминокислот с микроэлементами показывает, что они являются одним из перспективных способов борьбы с последствием воздействия стрессовых факторов окружающей среды на сельскохозяйственные культуры.

Ключевые слова: удобрения, питание растений, хелаты, аминокислотные хелаты, аминокислоты, микроэлементы.

The use of amino acids and their chelate complexes with trace elements in plant nutrition (review)

© 2022. D. V. Petukhov¹ ORCID: 0000-0002-7733-5250¹
 E. S. Izmet'shev^{1,2} ORCID: 0000-0001-5698-6292² A. V. Sazanov¹ ORCID: 0000-0002-6934-3330¹
 M. A. Zaitsev¹ ORCID: 0000-0001-8726-6714¹ E. V. Tovstik¹ ORCID: 0000-0003-1861-6076¹

¹Vyatka State University,
 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS,
 48, Pervomaiskaya St., Syktyvkar, Russia, 167000,
 e-mail: usr20941@vyatsu.ru

In the recent decade, the use of chelate complexes with microelements as fertilizers has become increasingly popular in agriculture. The advantage of their use lies in the fact that they are able to prevent the occurrence of undesirable processes that can occur in the soil or on the surface of leaves and lead to a decrease in the solubility of metal compounds, reducing their bioavailability.

In the production of chelates, such complexing agents are used as ions of zinc, iron (II), copper (II), manganese (II), molybdenum (VI), cobalt (II). Synthetic organic compounds such as ethylenediaminetetraacetic, diethylenetriaminepentaacetic, etidronic acids or their sodium and potassium salts have found widespread use as chelating agents. Despite the important role in the delivery of the necessary elements to plants, they have a significant drawback: when such chelate complexes come into contact with the plant cell, the microelement gets inside without a chelator. Decomposition occurs abiotically and proceeds very slowly, as a result of which chelators accumulate in the soil and cause negative consequences for the environment, being persistent pollutants.

Interest in the ecological safety of fertilizers stimulates research on the search and application of alternative chelating agents for their inclusion in the composition of chelate complexes with microelements. Biodegradable natural organic compounds such as lignosulfonates, humates, fulvates, as well as amino acids and low molecular weight peptides obtained by hydrolysis of proteins are currently considered as promising candidates. Due to effective adsorption, a high bioavailability of the chelate complex is achieved, while it becomes possible to reduce the applied dose of fertilizer based on it. Exogenous L-amino acids in the complexes can be "recognized" by plant cells, penetrate into them, and be included in the plant's metabolic pathways. Also, the experience of using fertilizers based on chelated complexes of amino acids with microelements shows that they are one of the most promising ways to combat the consequences of the impact of environmental stress factors on agricultural crops.

Keywords: fertilizers, plant nutrition, chelates, amino chelates, amino acids, trace elements.

В настоящее время проблема повышения биодоступности элементов питания для растений является одной из ключевых в растениеводстве [1]. Значительный успех в этом направлении достигнут за счёт применения хелатных комплексов с микроэлементами [2].

В течение последних десятилетий были синтезированы и внедрены в практику растениеводства удобрения с различными хелатирующими агентами [3, 4]. Преимущество применения аминокислот в качестве хелаторов заключается в повышении устойчивости растений к абиотическим факторам внешней среды и, следовательно, увеличении их урожайности [5, 6]. Увеличивающийся рост применения аминокислот в основном был обусловлен новым пониманием их роли в метаболизме растений [7].

Однако несмотря на то, что данная форма удобрений занимает одно из доминирующих положений на рынке агрохимикатов во многих странах, данные об эффекте их использования неоднозначны. Частично это связано с разным набором питательных элементов и аминокислот, входящих в состав удобрений, каждый из которых способен оказывать специфическое действие на растения. Несмотря на это, возможность использования аминокислот в качестве хелатирующих агентов для получения комплексов с микроэлементами не вызывает сомнений.

Целью настоящего обзора является обобщение данных о применении в качестве удобрений хелатных комплексов аминокислот с микроэлементами.

Объекты и методы исследования

Для достижения цели использовали поисковые системы по полным текстам научных

публикаций Google Scholar, ACS Publications, ScienceDirect. Поисковые запросы производили по ключевым словосочетаниям: «amino acids chelates», «amino acids in plant nutrition», «amino acids and trace elements», «transition metals amino acids complexes», «amino acids fertilizers» за период с 2000 по 2021 гг.

Аминокислотные хелаты

Развитие растениеводства на современном этапе немыслимо без применения хелатных комплексов с микроэлементами [8, 9]. К хелатам (от лат. *chela* – клешня) относят координационные соединения, в составе которых ионы металлов-комплексобразователей связаны одновременно с двумя или более донорными атомами би- или многодентатного лиганда. Аминокислоты бидентатны за счёт наличия в их молекуле двух атомов-доноров электронных пар – кислорода карбоксильной группы и азота аминогруппы. Связываясь с ионом комплексобразователя, они образуют комплексное соединение, состоящее из одного или нескольких гетероциклов [4, 10, 11].

Потенциал применения хелатных комплексов с микроэлементами в качестве удобрений был признан относительно недавно [12]. Например, хелаты железа были впервые использованы для корректировки питания растений в начале 50-х годов прошлого века [13].

Термин «аминокислотный хелат» был впервые введён в 1996 г. Национальной ассоциацией пищевой продукции (National Nutritional Foods Association, или NNFA) для обозначения хелатных комплексов аминокислот с микроэлементами. На тот момент данная группа соединений была одобрена для

обогащения пищевых продуктов макро- и микроэлементами [14]. В настоящее время аминокислотные хелаты используются и в растениеводстве.

Аминокислоты, входящие в состав данных комплексов, в отличие от чужеродных растительной клетке этилендиаминтетрауксусной (ЭДТУ) и диэтиленetriаминпентауксусной кислот (ДТПУ) представляют собой более экологически безопасные хелаторы, не проявляющие фитотоксичных свойств [15–18]. В качестве микроэлементов для получения удобрений на основе аминокислотных хелатов используют чаще всего ионы цинка, железа(II), меди(II), марганца(II), молибдена(VI), кобальта(II) и др.

Следует отметить, что не любые комбинации аминокислот с микроэлементами могут приводить к образованию прочных хелатных комплексов и, соответственно, применяться в качестве удобрений. Наиболее перспективными являются аминокислотные хелаты, молекулярная масса которых не превышает 800 Да. Относительно небольшой размер обеспечивает им свободное проникновение в растения через листья или корни [9]. В связи с этим для производства хелатных комплексов актуально использование аминокислот с молекулярной массой до 150–200 Да. Среди них глицин, аланин и другие аминокислоты [9, 19].

Важным свойством аминокислотных хелатов является их стабильность и электронейтральность. Последняя способствует их лучшему передвижению по растению, так как исключает химическое взаимодействие до адсорбции клетками растения, которая происходит за счёт действия транспортных белков [9, 18, 20–24].

Для производства удобрений на основе хелатных комплексов с микроэлементами в качестве источника аминокислот могут использоваться различные сырьевые ресурсы, в том числе отходы пищевой промышленности. Среди них гидролизат белка, который был получен в ходе переработки куриных перьев или молочной сыворотки [25, 26].

Применение аминокислотных хелатов в питании и защите растений от стресса

Различные исследования применения аминокислотных хелатов для предпосевной обработки семян и внекорневой подкормки растений неоднократно доказывали их эффективность по сравнению с минеральными

и прочими удобрениями на основе хелатных комплексов с микроэлементами [25, 27–31].

Эффективность цинка, хелатированного с гистидином и метионином, была показана на примере фасоли. Положительная роль заключалась в повышении урожайности и его питательной ценности [32]. Установлено, что хелатные комплексы этого же микроэлемента с такими аминокислотами как триптофан, глицин и лизин, способствуют повышению биомассы побегов фасоли и кукурузы; с глицином и аланином – накоплению цинка в различных структурных частях растений [5, 33]. Цинк, хелатированный с лизином, способствует увеличению содержания фотосинтетических пигментов в растениях кукурузы, значительно уменьшает повреждения, вызванные окислительным стрессом [5]. По результатам полевого эксперимента с применением аминокислотных хелатов лизина, метионина и треонина с цинком показано ускорение роста и повышение урожайности двух сортов лука «Behbahan» и «Perimavera» [34]. При этом комплекс Zn-лизин оказался наиболее перспективным хелатом, способствующим повышению концентрации цинка в тканях лука. Следует отметить, что применение одного лизина или его комплекса с Zn приводило к уменьшению содержания нитрат-ионов в луковичках по сравнению с контролем, а также в сравнении с обработкой неорганической солью цинка ($ZnSO_4$).

Использование в качестве индикатора такого морфологического признака растений, как окраска листьев, позволило установить, что аминокислотные хелаты перспективны в качестве стимуляторов биосинтеза хлорофилла и последующей его защиты от разрушения при неблагоприятных условиях [17, 35]. Кроме этого доказано, что включение аминокислот в состав удобрений позволяет повышать концентрацию хлорофилла в растениях [36].

Положительная роль удобрений на основе аминокислотных хелатов показана не только на примере синтеза хлорофилла, но и по таким морфологическим параметрам роста растений, как высота, количество листьев и размер боковых побегов [8, 29, 37]. Однако, несмотря на данные о благоприятном влиянии аминокислотных хелатов на развитие листьев, описаны случаи развития хлороза у некоторых растительных культур, например, огурца, в случае внекорневой подкормки [17].

В отдельных исследованиях показано влияние удобрений с аминокислотными хелатами на количество цветков и плодов, размер

семян [29, 30, 35]. Например, применение смеси пролина и триптофана под культуру граната в условиях засухи снижает долю потрескавшихся плодов [36]. В ряде исследований в условиях применения аминокислотных хелатов отмечено увеличение содержания L-аскорбиновой кислоты, титруемой кислотности, общего содержания каротиноидов и антиоксидантов в плодах [17, 28]. Установлено, что совместное применение хелатных комплексов железа на основе аргинина и глицина по сравнению с комплексом Fe(II)-ЭДТА способствует повышению активности антиоксидантных ферментов и аскорбатпероксидазы в побегах томатов [38].

В ряде работ, посвящённых исследованию аминокислотных хелатов, показана их роль в преодолении растениями стресса, вызванного факторами абиотической природы: климатом [8], высокой засоленностью почвы [16, 27, 28, 30, 39–44]. Доказано, что аминокислоты действуют как осмолиты, в связи с чем играют важную роль в открытии устьиц, синтезе белков, повышении активности некоторых антиоксидантных ферментов, сохранении целостности биомембран, а также транспорте ионов [21, 45]. На примере смеси аланина, серина, фенилаланина и тирозина показано её влияние на увеличение концентрации кальция, калия, железа, марганца и меди в листьях растений [42]. В отдельных исследованиях установлена эффективность применения аминокислотных хелатов на основе глицина и глутаминовой кислоты для усиления поглощения клетками корневой системы ионов кальция, железа(II), марганца(II) и цинка [37, 39, 41–48].

Потенциал применения аминокислотных хелатов в засоленных почвах и засушливом климате описан на примере железа(II). Использование хелатного комплекса на его основе с аргинином, глицином и гистидином, по сравнению с ЭДТА, в значительной степени снижает повреждение плодов томатов, вызванное засолением почв [40]. Кроме того, применение аминокислотных хелатов железа(II) в данных опытах позволило вернуть в норму содержание железа, цинка, азота и калия в побегах испытываемых культур, которое снижалось под действием солевого стресса. Проведённое исследование выявило изменение активности каталазы и аскорбатпероксидазы в листьях томатов, подвергшихся солевому стрессу. При этом подобное неблагоприятное воздействие частично облегчило применение аминокислотных хелатов Fe(II) [38, 40].

Подобные исследования в условиях солевого стресса с применением гидропоники были проведены на культурах *Lactuca sativa*. Сравнение проводилось между аминокислотными хелатами на основе цинка с аргинином, глицином и глутамином и сульфатом цинка [48]. Повреждение корней и снижение роста побегов в большей степени предотвращалось за счёт применения аминокислотного хелата цинка с глицином. Поступающий в растения цинк значительно снижал концентрацию натрия и увеличивал содержание калия в корнях и побегах растений, подвергшихся солевому стрессу.

Известно, что вода является основным ограничивающим фактором роста и развития растений в засушливом климате и на сухих почвах. Во многих странах, где наблюдается данная проблема, на сельское хозяйство приходится более 90–95% водопотребления [49, 50]. Управление питанием растений – одна из эффективных стратегий повышения эффективности использования воды в сельскохозяйственных системах. В связи с этим важно вносить удобрения с восстановленной формой азота (мочевина, соли аммония и аминокислоты), так как их применение повышает эффективность использования воды растениями в условиях её дефицита [51]. Преимуществом аминокислот в этой стратегии, по сравнению с прочими, является их способность непосредственно включаться в метаболизм растений [41].

Растения способны поглощать корневой системой или листьями широкий спектр аминокислот [52, 53]. Однако только некоторые аминокислоты способствуют росту высших растений [52]. В защите растений от засухи наибольшую роль отводят пролину и бетаину [11, 54]. Их положительная роль, заключающаяся в выведении растений из водного стресса, показана на примере *Solanum tuberosum* [55].

Входящие в состав удобрений аминокислотные хелаты с микро- и макроэлементами способствуют их накоплению в тканях растений, и, следовательно, повышают устойчивость растений к водному стрессу за счёт ингибирования перекисного окисления липидов (ПОЛ). Аминокислоты, поступившие в растения в виде хелатного комплекса, могут влиять на межклеточное распределение ионов натрия и хлорид-ионов и снижать их токсическое действие на метаболизм растения [8, 56, 57].

Удобрения с аминокислотными хелатами могут снижать негативное воздействие на растения и других факторов окружающей

среды. Среди них: значительные перепады температур, высокие концентрации тяжёлых металлов в почве, биотические стрессы, вызванные вредителями и болезнями сельскохозяйственных культур. Установлено, что растения, выращенные с использованием таких удобрений, содержат больше углеводов, осмолитов и питательных веществ, что позволяет им лучше переносить низкие температуры или заморозки.

Положительная роль экзогенных аминокислот в ингибировании процессов ПОЛ мембран показана не только при солевом стрессе, но и стрессе, вызванном высокими концентрациями тяжёлых металлов в почве [58]. Установлено, что аминокислоты непосредственно не влияют на поглощение ионов кадмия корнями растений из почвы, но при этом они играют важную роль в межклеточном распределении ионов кадмия [59].

Показано, что комплекс Zn-лизин препятствует накоплению кадмия в зерне, побегах и корнях пшеницы, а также способствует снижению окислительного стресса пропорционально дозировке его применения [43]. Внекорневая подкормка, включающая комплекс Zn-лизин, значительно увеличивает скорость фотосинтеза, урожай зерна, активность ферментов и содержание цинка в различных тканях пшеницы, подвергнутой токсическому воздействию кадмия [43].

Эффективность аминокислот показана и в условиях применения гербицида глифосата при выращивании сои. Известно, что глифосат способен ингибировать процессы фотосинтеза, снижать концентрацию питательных веществ и сухую биомассу растений. Внекорневая обработка растений смесью аминокислот позволила предотвратить негативные эффекты, вызванные данным стресс-фактором [60].

Положительная роль аргинина и путресцина, а также аминокислотных хелатов цинка с глицином и аланином показана на культуре пшеницы. Она заключалась в повышении скорости деления клеток в тканях тестируемой культуры, влиянии на её рост и развитие [61, 62].

Аналогичные испытания аминокислотных хелатов цинка в гидропонной культуре позволили доказать их роль в обеспечении доступности микроэлементов растениям, развитии корней и побегов. Среди испытываемых аминокислотных хелатов в случае комплекса Zn-аланин установлен наиболее высокий коэффициент транслокации цинка от корней к

побегам. Использованные в опытах аминокислоты способствовали росту растений. При этом триптофан и глицин оказывали наибольшее влияние на рост растений и уровень хлорофилла и каротиноидов в них [33].

В полевых испытаниях внекорневая подкормка озимой пшеницы хелатными комплексами аминокислот с микроэлементами в дозах 1,5 и 3,0 л/га позволила повысить урожайность на 17,4–17,8% по сравнению с контролем. Также улучшались хлебопекарные качества полученного зерна и его питательная ценность. Установлено снижение содержания глютена и повышение содержания белка от 16,4 в контроле до 17,5–17,9% в вариантах опыта с удобрениями. Максимальное содержание белка в зерне пшеницы отмечали в варианте опыта с дозой удобрения 2 л/га. В дозе 3,0 л/га содержание цинка в зерне пшеницы увеличилось на 7,5%, марганца – на 4,3%, меди – на 13,3% по сравнению с контролем [63].

Заключение

Результаты исследований, продемонстрированные в данном обзоре, позволяют заключить, что применение аминокислотных хелатов в качестве удобрений оказывает положительное действие на рост и развитие растений. Они помогают растениям справиться со стрессами, вызванными факторами как абиотической, так и биотической природы; защищают их от интоксикации тяжёлыми металлами. Применение хелатных комплексов аминокислот с микроэлементами позволяет снизить вносимую дозу удобрений за счёт большей биодоступности микроэлементов в их составе.

Аминокислотные хелаты представляют собой более эффективную и безопасную форму удобрений в силу отсутствия побочных эффектов, в том числе и для окружающей среды. Имеется перспектива их использования при решении определённых задач, например, для борьбы с дефицитом железа в карбонатных почвах.

Исследование роли компонентного состава удобрений на основе хелатных комплексов с микроэлементами и аминокислот, полученных из доступных сырьевых источников, в том числе из отходов пищевой промышленности, в будущем может привести к увеличению их доли на рынке агрохимикатов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-316-90019.

References

1. Niu J., Liu C., Huang M. Effects of foliar fertilization: a review of current status and future perspectives // *Soil Sci Plant Nutr.* 2021. V. 21. P. 104–118. doi: 10.1007/s42729-020-00346-3
2. Haydon M.J., Cobbett C.S. Transporters of ligands for essential metal ions in plants // *New Phytol.* 2007. V. 174. P. 499–506. doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.02051.x
3. Jeppsen R.B. Mineral supplementation in plants via amino acid chelation // *ACS Symposium Series.* 1992. V. 445. P. 320–331. doi: 10.1021/bk-1991-0445.ch025
4. Sekhon B.S. Chelates for micronutrient nutrition among crops // *Resonance.* 2003. V. 8. No. 7. P. 46–53. doi: 10.1007/bf02834402
5. Ahmad R., Ishaque W., Khan M., Ashraf U., Riaz M.A., Ghulam S., Ahmad A., Rizwan M., Ali S., Alkahtani S., Abdel-Daim M.M. Relief role of lysine chelated zinc (Zn) on 6-week-old maize plants under tannery wastewater irrigation stress // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020. V. 17. No. 14. P. 1–18. doi: 10.3390/ijerph17145161
6. Baghaie A., Keshavarzi M. The effectiveness of foliar applications of synthesized zinc-amino acid chelates and ZnSO₄ on the nutritional status of wheat plant cultivated in a soil contaminated with Cd and diesel oil // *International Archives of Health Sciences.* 2021. V. 8. No. 1. P. 37–44. doi: 10.4103/iahs.iahs_81_20
7. Wang W., Xu M., Wang G. New insights into the metabolism of aspartate-family amino acids in plant seeds // *Plant Reprod.* 2018. V. 31. P. 203–211. doi: 10.1007/s00497-018-0322-9
8. Souri M.K., Yarahmadi B. Effect of amino chelates foliar application on growth and development of marigold (*Calendula officinalis*) plants // *Iranian J. of Plant Prod. Techn.* 2016. V. 15. No. 2. P. 109–119.
9. Souri M.K. Chelates and aminochelates; and their role in plant nutrition. Tehran: Agriculture Education and Extension Press, 2015. 188 p.
10. Shoostari F., Souri M., Hasandokht M., Jari S. Glycine mitigates fertilizer requirements of agricultural crops: case study with cucumber as a high fertilizer demanding crop // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture.* 2020. V. 7. P. 1–10. doi: 10.1186/s40538-020-00185-5
11. Marschner H. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2012. 684 p. doi: 10.1017/S001447971100130X
12. Pieterse A.H., Bhalla P.R., Sabharwal P.S. Investigations on the effects of metal ions and chelating agents on growth and flowering of *Lemna gibba* G3 // *Plant Cell Physiol.* 1970. V. 11. No. 6. P. 879–889. doi: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a074579
13. Jacobson L. Maintenance of iron supply in nutrient solutions by a single addition of ferric potassium ethylenediamine tetraacetate // *Plant Physiol.* 1951. V. 26. No. 2. P. 411–413. doi: 10.1104/pp.26.2.411
14. Pawlos M., Znamirowska A., Zaguła G., Buniowska M. Use of calcium amino acid chelate in the production of acid-curd goat cheese // *Foods.* 2020. V. 9. No. 8. P. 1–13. doi: 10.3390/foods9080994
15. Garcia A.L., Madrid R., Gimeno V., Rodriguez-Ortega W.M., Nicolas N., Garcia-Sanchez F. The effects of amino acids fertilization incorporated to the nutrient solution on mineral composition and growth in tomato seedlings // *Spanish Journal of Agricultural Research.* 2011. V. 9. No. 3. P. 852–861. doi: 10.5424/sjar/20110903-399-10
16. Ghasemi S., Khoshgoftarmansh A.H., Hadadzadeh H., Jafari M. Synthesis of iron-amino acid chelates and evaluation of their efficacy as iron source and growth stimulator for tomato in nutrient solution culture // *J. Plant Growth. Regul.* 2012. V. 31. No. 4. P. 498–508. doi: 10.1007/s00344-012-9259-7
17. Fahimi F., Souri M.K., Yaghoubi Sooraki F. Growth and development of greenhouse cucumber under foliar application of biomin and humifolin fertilizers in comparison to their soil application and NPK // *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture.* 2016. V. 7. No. 25. P. 143–152.
18. Souri M.K. Aminochelate fertilizers: the new approach to the old problem; a review // *Open Agriculture.* 2016. V. 1. No. 1. P. 118–123. doi: 10.1515/opag-2016-0016
19. Mirbolook A., Lakzian A., Rasouli Sadaghiani M., Sepehr E., Amir L., Hakimi M. Fortification of bread wheat with iron through soil and foliar application of iron-organic-complexes // *Journal of Plant Nutrition.* 2021. V. 44. No. 10. P. 1386–1403. doi: 10.1080/00103624.2020.1744635
20. El-Nasharty A.B., Rezk A.I., El-Nwehy S.S. Amino acids and its role in plant nutrition and crop production. A review // *Middle East Journal of Applied Sciences.* 2021. V. 11. No. 2. P. 400–413. doi: 10.36632/mejas/2021.11.2.32
21. Haydon M.J., Cobbett C.S. Transporters of ligands for essential metal ions in plants // *The New Phytologist.* 2007. V. 174. No. 3. P. 499–506. doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.02051.x
22. Svennerstam H., Ganeteg U., Bellini C., Nasholm T. Comprehensive screening of *Arabidopsis* mutants suggests the lysine histidine transporter 1 to be involved in plant uptake of amino acids // *Plant Physiol.* 2007. V. 143. No. 4. P. 1853–1860. doi: 10.1104/pp.106.092205
23. Tegeder M. Transporters involved in source to sink partitioning of amino acids and ureides: Opportunities for crop improvement // *Journal of Experimental Botany.* 2014. V. 65. No. 7. P. 1865–1878. doi: 10.1093/jxb/eru012
24. Rizwan M., Ali S., Hussain A., Ali Q., Shakoob M.B., Zia-Ur-Rehman M., Farid M., Asma M. Effect of zinc-lysine on growth, yield and cadmium uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) and health risk assessment // *Chemosphere.* 2017. V. 187. P. 35–42. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.08.071
25. Jie M., Raza W., Xu Y.C., Shen Q.R. Preparation and optimization of amino acid chelated micronutrient

- fertilizer by hydrolyzation of chicken waste feathers and the effects on growth of rice // *Journal of Plant Nutrition*. 2008. V. 31. No. 3 P. 571–582. doi: 10.1080/01904160801895092
26. Terentyev Yu.N., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Sazanov A.V., Sazanova M.L., Kozvonin V.A., Petukhov D.V. Technology for conversion of whey into organic-mineral fertilizers with amino acids // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 2. P. 87–93. doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-087-093
27. Zhou Z., Zhou J., Li R., Wang H., Wang J. Effect of exogenous amino acids on Cu uptake and translocation in maize seedlings // *Plant and Soil*. 2007. V. 292. No. 1–2. P. 105–117. doi: 10.1007/s11104-007-9206-8
28. Keutgen A., Pawelzik E. Contribution of amino acids to strawberry fruit quality and their relevance as stress indicators under NaCl salinity // *Food Chemistry*. 2008. V. 111. No. 3. P. 642–647. doi: 10.1016/j.foodchem.2008.04.032
29. Amin A.A., Gharib F.A.E., El-Awadi M., Rashad E.-S.M. Physiological response of onion plants to foliar application of putrescine and glutamine // *Scientia Horticulturae*. 2011. V. 129. No. 3. P. 353–360. doi: 10.1016/j.scienta.2011.03.052
30. Ghasemi S., Khoshgoftarmanesh A.H., Afyuni M., Hadadzadeh H. The effectiveness of foliar applications of synthesized zinc-amino acid chelates in comparison with zinc sulfate to increase yield and grain nutritional quality of wheat // *European Journal of Agronomy*. 2013. V. 45. P. 68–74. doi: 10.1016/j.eja.2012.10.012
31. Ghoname A.A., El-Bassiouny A.M., Abdel-Mawgoud A.M.R., El-Tohamy W.A., Gruda N. Growth, yield and blossom-end rot incidence in bell pepper as affected by phosphorus level and amino acid applications // *Gesunde Pflanzen*. 2012. V. 64. No. 1. P. 29–37. doi: 10.1007/s10343-012-0272-3
32. Tabesh M., Kiani S., Khoshgoftarmanesh A.H. The effectiveness of seed priming and foliar application of zinc-amino acid chelates in comparison with zinc sulfate on yield and grain nutritional quality of common bean // *Journal of Plant Nutrition*. 2020. V. 43. No. 14. P. 2106–2116. doi: 10.1080/01904167.2020.1771579
33. Mirbolook A., Rasouli Sadaghiani M., Sepehr E., Lakzian A., Hakimi M. Synthesized Zn(II)-amino acid and -chitosan chelates to increase Zn uptake by bean (*Phaseolus vulgaris*) // *Journal of Plant Growth Regulation*. 2021. V. 40. P. 831–847. doi: 10.1007/s00344-020-10151-y
34. Rafie M.R., Khoshgoftarmanesh A.H., Shariatmadari H., Darabi A., Dalir N. Influence of foliar-applied zinc in the form of mineral and complexed with amino acids on yield and nutritional quality of onion under field conditions // *Scientia Horticulturae*. 2017. V. 216. P. 160–168. doi: 10.1016/j.scienta.2017.01.014
35. Saeedi R., Etemadi N., Nikbakht A. Calcium chelated with amino acids improves quality and postharvest life of lisianthus (*Eustoma grandiflorum* cv. Cinderella lime) // *HortScience*. 2015. V. 50. P. 1394–1398. doi: 10.21273/HORTSCI.50.9.1394
36. El Sayed O.M., El Gammal O.H.M., Salama A.S.M. Effect of proline and tryptophan amino acids on yield and fruit quality of manfalouty pomegranate variety // *Scientia Horticulturae*. 2014. V. 169. P. 1–5. doi: 10.1016/j.scienta.2014.01.023
37. Koksai A.I., Dumanoglu H., Gunes N.T., Aktas M. The effects of different amino acid chelate foliar fertilizers on yield, fruit quality, shoot growth and Fe, Zn, Cu, Mn content of leaves in williams pear cultivar (*Pyrus communis* L.) // *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 1999. V. 23. No. 6. P. 651–658.
38. Teixeira W.F., Fagan E.B., Soares L.H., Umburanas R.C., Reichardt K., Neto D.D. Foliar and seed application of amino acids affects the antioxidant metabolism of the soybean crop // *Frontiers in Plant Science*. 2017. V. 8. P. 1–14. doi: 10.3389/fpls.2017.00327
39. Sadak M., Abdoelhamid M.T., Schmidhalter U. Effect of foliar application of aminoacids on plant yield and some physiological parameters in bean plants irrigated with sea water // *Acta Biol. Colomb*. 2015. V. 20. No. 1. P. 141–152. doi: 10.15446/abc.v20n1.42865
40. Ghasemi S., Khoshgoftarmanesh A.H., Afyuni M., Hadadzadeh H. Iron(II)-amino acid chelates alleviate salt-stress induced oxidative damages on tomato grown in nutrient solution culture // *Scientia Horticulturae*. 2014. V. 165. P. 91–98. doi: 10.1016/j.scienta.2013.10.037
41. Ge T., Song S., Roberts P., Jones D.L., Huang D., Iwasaki K. Amino acids as a nitrogen source for tomato seedlings: the use of dual-labeled (¹³C, ¹⁵N) glycine to test for direct uptake by tomato seedlings // *Environmental and Experimental Botany*. 2009. V. 66. No. 3. P. 357–361. doi: 10.1016/j.envexpbot.2009.05.004
42. Amira M.S. Abdul Qados Effect of arginine on growth, yield and chemical constituents of wheat grown under salinity condition // *Academic Journal of Plant Sciences*. 2009. V. 2. P. 267–278.
43. Sasse J., Martinoia E., Northen T. Feed your friends: do plant exudates shape the root microbiome? // *Trends Plant Sci*. 2018. V. 23. No. 1. P. 25–41. doi: 10.1016/j.tplants.2017.09.003
44. Thakur P.S., Rai V.K. Dynamics of amino acid accumulation in two differentially drought resistant *Zea mays* cultivar in response to osmotic stress // *Environmental and Experimental Botany*. 1982. V. 22. No. 2. P. 221–226. doi: 10.1016/0098-8472(82)90042-9
45. Forsum O., Svennerstam H., Ganeteg U., Nasholm T. Capacities and constraints of amino acid utilization in *Arabidopsis* // *The New Phytologist*. 2008. V. 179. No. 4. P. 1058–1069. doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02546.x
46. Sanchez A.S., Juarez M., Sanchez-Andreu J., Jorda J., Bermudez D. Use of humic substances and amino acids to enhance iron availability for tomato plants from applications of the chelate FeEDDHA // *Journal of*

- Plant Nutrition. 2005. V. 28. No. 11. P. 1877–1886. doi: 10.1080/01904160500306359
47. Souri M.K., Sooraki F.Y., Moghadamyar M. Growth and quality of cucumber, tomato, and green bean under foliar and soil applications of an aminochelate fertilizer // *Hortic. Environ. Biotechnol.* 2017. V. 58. P. 530–536. doi: 10.1007/s13580-017-0349-0
48. Mohammadi P., Khoshgoftarmanesh A.H. The effectiveness of synthetic zinc (Zn)-amino chelates in supplying Zn and alleviating salt-induced damages on hydroponically grown lettuce // *Scientia Horticulturae.* 2014. V. 172. P. 117–123. doi: 10.1016/j.scienta.2014.03.047
49. Souri M.K., Neumann G., Romheld V. Nitrogen forms and water consumption in tomato plants // *Horticulture Environment and Biotechnology.* 2009. V. 50. P. 377–383.
50. Guo F.-Q., Young J., Crawford N.M. The nitrate transporter AtNRT1.1 (CHL1) functions in stomatal opening and contributes to drought susceptibility in *Arabidopsis* // *The Plant Cell.* 2003. V. 15. No. 1. P. 107–117. doi: 10.1105/tpc.006312
51. Claussen W. Growth, water use efficiency, and proline content of hydroponically grown tomato plants as affected by nitrogen source and nutrient concentration // *Plant and Soil.* 2002. V. 247. No. 2. P. 199–209. doi: 10.1023/A:1021453432329
52. Svennerstam H., Ganeteg U., Nasholm T. Root uptake of cationic amino acids by *Arabidopsis* depends on functional expression of amino acid permease 5 // *The New Phytologist.* 2008. V. 180. No. 3. P. 620–630. doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02589.x
53. Nasholm T., Kielland K., Ganeteg U. Uptake of organic nitrogen by plants // *The New Phytologist.* 2009. V. 182. No. 1. P. 34–48. doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02751.x
54. Ashraf M., Foolad M.R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance // *Environmental and Experimental Botany.* 2007. V. 59. No. 2. P. 206–216. doi: 10.1016/j.envexpbot.2005.12.006
55. Knipp G., Honermeier B. Effect of water stress on proline accumulation of genetically modified potatoes (*Solanum tuberosum* L.) generating fructans // *Journal of Plant Physiology.* 2006. V. 163. No. 4. P. 392–397. doi: 10.1016/j.jplph.2005.03.014
56. Hoque M.A., Okuma E., Banu M.N.A., Nakamura Y., Shimoiishi Y., Murata Y. Exogenous proline mitigates the detrimental effects of salt stress more than exogenous betaine by increasing antioxidant enzyme activities // *Journal of Plant Physiology.* 2007. V. 164. No. 5. P. 553–561. doi: 10.1016/j.jplph.2006.03.010
57. Zeid I.M. Effect of arginine and urea on polyamines content and growth of bean under salinity stress // *Acta Physiologiae Plantarum.* 2009. V. 31. No. 1. P. 65–70. doi: 10.1007/s11738-008-0201-3
58. Sharma S.S., Dietz K.J. The significance of amino acids and amino acid-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress // *Journal of Experimental Botany.* 2006. V. 57. No. 4. P. 711–726. doi: 10.1093/jxb/erj073
59. Zhang S., Hu F., Li H. Effects of earthworm mucus and amino acids on cadmium subcellular distribution and chemical forms in tomato seedlings // *Bioresour. Technol.* 2009. V. 100. No. 17. P. 4041–4046. doi: 10.1016/j.biortech.2009.03.028
60. Zobiolo L.H.S., de Oliveira Junior R.S., Constantin J., Kremer R.J., Biffe D.F. Amino acid application can be an alternative to prevent glyphosate injury in glyphosate-resistant soybeans // *Journal of Plant Nutrition.* 2012. V. 35. No. 2. P. 268–287. doi: 10.1080/01904167.2012.636130
61. Mirbolook A., Lakzian A., Rasouli Sadaghiani M., Sepehr E., Hakimi M. Fortification of bread wheat using synthesized Zn-Glycine and Zn-Alanine chelates in comparison with ZnSO₄ in a calcareous soil // *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 2020. V. 51. P. 1048–1064. doi: 10.1080/00103624.2020.1744635
62. El-Bassiouny H.M., Mostafa H.A., El-Khawas S.A., Hassanein R.A., Khalil S.I., Abd El-Monem A.A. Physiological responses of wheat plant to foliar treatments with arginine or putrescine // *Austral J Basic Appl Sci.* 2008. V. 2. P. 1390–1403.
63. Shapowal O., Mozharova I. A comparative study of application of multifunctional fertilizers based on amino acids and trace elements for winter wheat // *BIO Web of Conferences.* 2020. V. 17. P. 1–5. doi: 10.1051/bioconf/20201700251