

Р.Р. Сафина¹ ✉
Р.В. Окунев²
Г.Ф. Рахманова¹
К.Р. Гарафутдинова¹

¹Татарский НИИ агрохимии и почвоведения — обособленное структурное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр "Казанский научный центр Российской академии наук"», Казань, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

✉ rufina.masnavieva.63@gmail.com

Поступила в редакцию:
07.06.2023

Одобрена после рецензирования:
20.11.2023

Принята к публикации:
04.12.2023

Research article

DOI: 10.32634/0869-8155-2023-377-12-124-128

Rufina R. Safina¹ ✉
Rodion V. Okunev²
Gulnara F. Rakhmanova¹
Kamila R. Garafutdinova¹

¹Tatar Research Institute of Agricultural Chemistry and Soil Science — a Separate Structural Subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science "Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Kazan, Russia

²Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

✉ rufina.masnavieva.63@gmail.com

Received by the editorial office:
07.06.2023

Accepted in revised:
20.11.2023

Accepted for publication:
04.12.2023

Содержание аминокислот в растениях томата при применении препаратов «Глутамат натрия» и «Аминозол» в условиях солевого стресса

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Изучение влияния препаратов, содержащих аминокислоты, на накопление свободных аминокислот в растениях актуально в оценке их регуляторного и антистрессового действия.

Методы. Лабораторный опыт проводили в 2020 г. на растениях томата сорта Бетта. В качестве субстрата использовали серую лесную среднесуглинистую почву. Опыт выполняли на почве с разным засолением — а) контроль (почва не засолена), б) засоленная почва (50 ммоль/кг NaCl), в) засоленная почва (100 ммоль/кг NaCl), используя три варианта подкормки: без подкормки, подкормка «Глутаматом натрия», подкормка препаратом «Аминозол». Аминокислоты экстрагировали из корней и надземных частей растений в фазе вегетативного роста смесью «этанол + хлороформ + вода» (12:5:2) и применяли метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с предколоночной дериватизацией аминокислот фенилизотиоцианатом.

Результаты. Засоление почвы хлоридом натрия вызвало увеличение количества свободных аминокислот в проростках томата. Суммарное содержание аминокислот возрастало до 849,8 мкг/кг (50 ммоль/кг NaCl) и 606,9 мкг/кг (100 ммоль/кг NaCl) по сравнению с контрольной почвой (385,3 мкг/кг). Засоление способствовало накоплению серина (от 50,4 до 414,4 мкг/кг) в проростках. Обработка препаратами («Глутамат натрия» и «Аминозол») повлияла на накопление ряда аминокислот, отвечающих за стрессоустойчивость растений. Подкормка «Глутаматом натрия» повысила общую концентрацию аминокислот до 1146,6 мкг/кг (50 ммоль/кг NaCl) и 1017,7 мкг/кг (100 ммоль/кг NaCl) по сравнению с соответствующими вариантами без подкормки. При этом увеличилась содержание глутаминовой (до 188,3 и 425,1 мкг/кг) и аспаргиновой (до 50,8 и 198,7 мкг/кг) кислот. «Аминозол» способствовал увеличению суммы аминокислот до 1834,2 мкг/кг (50 ммоль/кг NaCl) и 934,4 мкг/кг (100 ммоль/кг NaCl) соответственно.

Ключевые слова: засоление почвы, растения, томаты, «Глутамат натрия», «Аминозол», свободные аминокислоты

Для цитирования: Сафина Р.Р., Окунев Р.В., Рахманова Г.Ф., Гарафутдинова К.Р. Содержание аминокислот в растениях томата при применении препаратов «Глутамат натрия» и «Аминозол» в условиях солевого стресса. *Аграрная наука*. 2023; 377(12): 124–128. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-124-128>

© Сафина Р.Р., Окунев Р.В., Рахманова Г.Ф., Гарафутдинова К.Р.

The content of amino acids in tomato plants when using the preparations “Monosodium Glutamate” and “Aminosol” in conditions of salt stress

ABSTRACT

Relevance. The study of the effect of preparations containing amino acids on the accumulation of free amino acids in plants is relevant in assessing their regulatory and anti-stress effects.

Methods. A laboratory experiment was carried out in 2020 on tomato plants of the Betta variety. Gray forest medium loamy soil was used as a substrate. The experiment was performed on soil with different salinity — a) control (the soil is not saline), b) saline soil (50 mmol/kg NaCl), c) saline soil (100 mmol/kg NaCl), using three feeding options: without top dressing, top dressing with “Sodium Glutamate”, top dressing with “Aminosol”. Amino acids were extracted from the roots and aboveground parts of plants in the vegetative growth phase with a mixture of “ethanol + chloroform + water” (12:5:2) and the method of high-performance liquid chromatography (HPLC) with pre-columnar derivatization of amino acids with phenylisothiocyanate was used.

Results. Soil salinization with sodium chloride caused an increase in the amount of free amino acids in tomato seedlings. The total amino acid content increased to 849.8 µg/kg (50 mmol/kg NaCl) and 606.9 µg/kg (100 mmol/kg NaCl) compared to the control soil (385.3 µg/kg). Salinity contributed to the accumulation of serine (from 50.4 to 414.4 µg/kg) in seedlings. Treatment with preparations (“Monosodium glutamate” and “Aminosol”) affected the accumulation of a number of amino acids responsible for plant stress resistance. Supplementation with monosodium glutamate increased the total amino acid concentration to 1146.6 µg/kg (50 mmol/kg NaCl) and 1017.7 µg/kg (100 mmol/kg NaCl) compared to the corresponding variants without supplementation. At the same time, the content of glutamic (up to 188.3 and 425.1 µg/kg) and aspartic (up to 50.8 and 198.7 µg/kg) acids increased. “Aminosol” contributed to an increase in the amount of amino acids to 1834.2 µg/kg (50 mmol/kg NaCl) and 934.4 µg/kg (100 mmol/kg NaCl), respectively.

Key words: soil salinization, plants, tomatoes, “Monosodium glutamate”, “Aminosol”, free amino acids

For citation: Safina R.R., Okunev R.V., Rakhmanova G.F., Garafutdinova K.R. The content of amino acids in tomato plants when using the preparations “Monosodium Glutamate” and “Aminosol” in conditions of salt stress. *Agrarian science*. 2023; 377(12): 124–128 (In Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-124-128>

© Safina R.R., Okunev R.V., Rakhmanova G.F., Garafutdinova K.R.

Введение/Introduction

Аминокислоты играют несколько важных ролей в жизни растений. Они участвуют в регуляции множества метаболических и биохимических путей, тем самым влияя на многочисленные физиологические процессы в растениях [1].

Помимо того что свободные аминокислоты — строительные блоки для вновь синтезируемых белков, многие аминокислоты, в том числе не участвующие в синтезе белка, играют важную роль в развитии растений и участвуют в реакции растений на стрессы окружающей среды [2].

Засоление — один из основных факторов окружающей среды, снижающих рост, развитие и продуктивность растений из-за ионной токсичности, а также осмотического стресса, которые влияют на ряд физиологических процессов и в конечном итоге подавляют фотосинтез [3].

По данным Международного института окружающей среды и развития и Института мировых ресурсов, около 10% площади суши и половина орошаемых земель в мире подвержены засолению. На территории России на 2020 год площадь сельскохозяйственных угодий, подверженных засолению, составила 235,86 тыс. га¹.

Мощный защитный механизм, позволяющий поддерживать жизнеспособность клеток в условиях засоления, — аккумуляция низкомолекулярных соединений — аминокислот, которые могут участвовать в осмотической регуляции [4]. Например, установлено, что способность к аккумуляции пролина обеспечивает солетолерантность растений [5]. Аминокислота защищает фотосинтетический аппарат, выступает резервом для органического азота во время восстановления и влияет на рост растений во время стресса [6]. З.Ш. Ибрагимов (2022 г.) предполагает, что причина значительного роста содержания свободного пролина в листьях сои — разрушение белков в результате засоления (в 6,5 раз) [5].

В работе Е.Г. Остроженковой (2021 г.) описано, что при солевом стрессе ряд аминокислот в образцах пшеницы характеризовался тенденцией к снижению концентрации — это позволяет предположить прекращение их синтеза в пользу осморегуляторов. Под действием хлорида натрия с концентрациями 0,1 М и 1 М значения содержания аспарагина и аспартата относительно совпадают, а при концентрации 5 М происходило резкое снижение. Увеличение содержания треонина в растениях наблюдается при низких концентрациях хлорида натрия. Для изолейцина, лейцина и валина изменения в концентрациях незначительны при самой низкой концентрации соли [7].

Растения имеют способность к самостоятельному синтезу аминокислот, но по мере роста и воздействия на них стрессовых факторов поступление их извне дает возможность растению ускорить метаболические процессы [8]. Так, в работе S. Deivanai (2011 г.), обработка растений 0,1 М пролина способствовала опережению роста у проростков риса [9]. В исследовании Т.А. Рябчинской и Т.В. Зимина (2017 г.) выявлено, что при обработке семян ячменя аминокислотами (пролин, валин, глутамин, изолейцин, глицин, фенилаланин, аргинин) в крайне низких дозировках (от 0,01 до 0,5 мл / 1 т семян) повышаются защитные реакции и активность отдельных ростовых процессов [10].

Пролин повышает адаптивность при воздействии стрессов, не выходящих за рамки нормы реакции, и

не работает при более сильных воздействиях. В более жестких условиях устойчивость обеспечивается механизмами, в которых задействованы другие аминокислоты, такие как глицин и метионин. Сочетание всех трех аминокислот обеспечивает максимальную защиту от стресса. На этом свойстве основана применяемая в полевых условиях защита посевов от стрессов при обработке комплексом аминокислот [11].

Таким образом, регуляция накопления аминокислот и продуктов их метаболизма может иметь важное значение для развития, роста и стрессоустойчивости растений. В связи с этим изучение влияния препаратов, содержащих аминокислоты, на накопление свободных аминокислот в растениях актуально в оценке их регуляторного и антистрессового действия.

Цель исследования — изучить действие «Глутамата натрия» и препарата «Аминозол» на количество свободных аминокислот в растениях томата в условиях солевого стресса.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Лабораторные исследования проводили в 2020 г. на базе ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Исследуемый образец — томат сорта Бетта (*Solanum lycopersicum* L.) («Гавриш», Россия). Раннеспелый, детерминированный, низкорослый сорт, удобен для выращивания в лабораторных условиях. Семена томата проращивали в закрытом грунте для рассады в климатической камере (освещение — 60 Вт/м² в течение 16–18 часов в день; температура: дневная — +22 °С, ночная — 16–18 °С; влажность — 60–70%). Через 21 день проростки пересаживали в опытные контейнеры (объем 0,9 кг) в искусственно засоленную почву и проводили листовую подкормку «Глутаматом натрия» и препаратом «Аминозол». В качестве субстрата использовали серую лесную среднесуглинистую почву (отобрана в Пестречинском районе Республики Татарстан летом 2020 г.).

Схема опыта

- А) контрольная почва (без засоления):
 - 1) без подкормки;
 - 2) подкормка «Глутаматом натрия»;
 - 3) подкормка препаратом «Аминозол»;
- Б) засоленная почва (50 ммоль/кг NaCl):
 - 4) без подкормки;
 - 5) подкормка «Глутаматом натрия»;
 - 6) подкормка препаратом «Аминозол»;
- В) засоленная почва (100 ммоль/кг NaCl):
 - 7) без подкормки;
 - 8) подкормка «Глутаматом натрия»;
 - 9) подкормка препаратом «Аминозол».

Засоление моделировали внесением NaCl («ХимМед-Поволжье», Россия) в концентрациях 50 и 100 ммоль/кг. Дозы хлорида натрия были установлены исходя из результатов литературных источников [6].

«Глутамат натрия» ($C_5H_8NO_4Na \times H_2O$) (г. Гуру, Китай) — мононатриевая соль глутаминовой кислоты (Е621). Раствор «Глутамата натрия» готовили с соответствующим количеством вещества в пересчете на глутаминовую кислоту.

¹ Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова. 2021; 864.

«Аминозол» (АО Фирма «Август», Россия) — жидкое органическое удобрение с полным комплексом аминокислот, которое производят из продуктов животного происхождения. Препарат «Аминозол» использовали в количестве, указанном производителем (5 мл на 1 л воды).

Аминокислоты экстрагировали из растений томата в фазе вегетативного роста (через 21 день после пересадки) смесью «этанол + хлороформ + вода» (12:5:2) и применяли метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с предколоночной дериватизацией аминокислот фенилизотиоцианатом [12].

Статистическую обработку данных опыта проводили с помощью компьютерной программы Microsoft Office Excel 2016 (США).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В результате исследований в растениях томата установлено содержание 17 аминокислот (табл. 1), из которых 9 (пролин, аланин, фенилаланин, изолейцин, серин, метионин, лизин, аспарагиновая кислота, глутаминовая кислота) — незаменимые.

В контрольном образце без подкормки общее количество аминокислот в растениях составило 385,3 мкг/кг. Основные аминокислоты — гистидин (19,7% от общего содержания), глицин (14,0%), серин (13,1%), аспарагиновая кислота (7,9%).

Препараты способствовали повышению содержания аминокислот. После применения «Глутамата натрия» сумма аминокислот увеличилась до 491,1 мкг/кг. В этом варианте преобладали такие аминокислоты, как глутаминовая кислота (21,9% от общего содержания), гистидин (13,4%), глицин (12,9%), аспарагиновая кислота (10,7%), серин (8,3%).

Применение препарата «Аминозол» также способствовало увеличению содержания аминокислот в растениях до 647,2 мкг/кг. Доминирующими аминокислотами были глицин (19,2%), гистидин (17,1%), серин (9,4%), валин (7,6%).

Так, в растениях, выращенных в контрольной почве (без засоления), во всех вариантах обработки в основном наблюдали повышение содержания глицина (в 1,2–2,3 раза) по сравнению с вариантом без подкормки. Низкое содержание установлено для аспарагина.

Таблица 1. Содержание свободных аминокислот в растениях томата в контрольной почве без засоления (мкг/кг сухого вещества)

Table 1. The content of free amino acids in tomato plants in the control soil without salinization (mcg/kg of dry matter)

Аминокислота	Без подкормки	Глутамат натрия	Аминозол
Аспарагиновая кислота	30,60 ± 1,08	52,70 ± 0,83	47,60 ± 0,76
Глутаминовая кислота	24,80 ± 0,55	107,30 ± 0,30	35,40 ± 0,78
Аспарагин	3,10 ± 0,30	1,00 ± 0,08	1,20 ± 0,32
Серин	50,40 ± 0,42	40,60 ± 0,25	60,70 ± 0,75
Глутамин	11,30 ± 0,35	9,00 ± 0,35	18,00 ± 0,84
Глицин	54,10 ± 0,45	63,20 ± 0,55	124,00 ± 0,93
Гистидин	75,80 ± 0,61	65,70 ± 0,59	110,80 ± 0,95
Аргинин	16,00 ± 0,45	11,00 ± 0,62	15,80 ± 0,89
Треонин	7,90 ± 0,53	8,30 ± 0,42	16,90 ± 0,85
Аланин	6,50 ± 0,35	9,30 ± 0,44	21,30 ± 0,57
Пролин	9,40 ± 0,58	8,60 ± 0,36	9,80 ± 0,82
Тирозин	22,10 ± 0,55	35,00 ± 0,74	44,50 ± 0,76
Валин	15,90 ± 0,55	25,20 ± 0,40	49,40 ± 0,55
Изолейцин	8,80 ± 0,71	11,40 ± 0,99	14,30 ± 0,74
Лейцин	15,30 ± 0,96	9,70 ± 0,82	20,70 ± 0,58
Фенилаланин	17,20 ± 0,49	19,50 ± 0,72	27,80 ± 0,75
Лизин	16,10 ± 0,75	13,60 ± 0,61	29,00 ± 0,95
Сумма	385,30	491,10	647,20

Аминокислоты по-разному реагировали на солевой стресс. Засоление почвы хлоридом натрия привело к значительному увеличению общего содержания свободных аминокислот в вариантах без подкормки — в 2,2 раза (50 ммоль/кг NaCl) и в 1,6 раза (100 ммоль/кг NaCl) по сравнению с контрольной почвой (табл. 2).

При засолении почвы выявлено понижение содержания аспарагиновой кислоты в 2,5 раза и 1,5 раза, глутаминовой кислоты в 1,3 раза при 50 и 100 ммоль/кг NaCl соответственно. По-видимому, это связано с их участием в биосинтезе других аминокислот в условиях солевого стресса.

Повышение содержания наблюдали для серина (в 1,1–1,3 раза), глутамин (в 1,4–1,5 раза), глицина (в 1,1–1,4 раза), аргинина (в 1,1–1,3 раза), треонина (в 1,9–2,3 раза), аланина (в 1,8–2 раза), пролина (в 1,9–2 раза), тирозина (в 1,3–1,9 раза), валина

Таблица 2. Содержание свободных аминокислот в растениях томата при разной степени засоления почвы (мкг/кг сухого вещества)
Table 2. The content of free amino acids in tomato plants at different degrees of soil salinity (mcg/kg of dry matter)

Аминокислота	50 ммоль/кг NaCl			100 ммоль/кг NaCl		
	без подкормки	Глутамат натрия	Аминозол	без подкормки	Глутамат натрия	Аминозол
Аспарагиновая кислота	12,30 ± 0,64	198,70 ± 0,70	24,40 ± 0,55	20,20 ± 0,49	50,80 ± 0,80	42,50 ± 0,61
Глутаминовая кислота	19,40 ± 0,75	188,30 ± 0,74	22,90 ± 0,85	18,60 ± 0,95	425,10 ± 0,71	21,40 ± 0,53
Аспарагин	3,100 ± 0,70	1,70 ± 0,56	7,900 ± 0,85	2,10 ± 0,51	1,10 ± 0,23	1,10 ± 0,15
Серин	414,40 ± 1,03	88,70 ± 0,62	327,80 ± 0,82	245,60 ± 0,55	174,40 ± 0,60	312,80 ± 0,91
Глутамин	16,90 ± 0,93	17,40 ± 0,60	20,90 ± 0,76	17,10 ± 0,79	10,50 ± 1,10	26,60 ± 0,92
Глицин	75,80 ± 0,81	122,80 ± 0,80	181,80 ± 0,70	60,20 ± 0,75	70,70 ± 0,71	155,40 ± 0,87
Гистидин	98,50 ± 0,76	28,60 ± 0,50	194,10 ± 0,70	65,50 ± 0,64	20,70 ± 0,87	73,20 ± 0,75
Аргинин	17,60 ± 0,95	27,50 ± 0,75	23,50 ± 0,68	20,60 ± 0,55	32,40 ± 0,61	55,90 ± 0,96
Треонин	15,00 ± 0,95	19,50 ± 0,67	49,50 ± 0,64*	18,60 ± 0,60	20,60 ± 0,95	25,30 ± 0,60
Аланин	13,00 ± 0,85	26,50 ± 0,80	39,30 ± 0,68	12,10 ± 0,49	28,60 ± 0,65	22,20 ± 0,79
Пролин	18,30 ± 0,65	52,50 ± 0,60	32,70 ± 0,62	19,20 ± 0,72	25,10 ± 0,75	13,20 ± 0,50
Тирозин	42,00 ± 0,95	62,30 ± 0,60	219,70 ± 0,46	30,20 ± 0,67	28,50 ± 0,55	38,20 ± 0,70
Валин	30,20 ± 0,75	78,20 ± 0,70	173,90 ± 0,75	24,30 ± 0,57	22,30 ± 0,72	36,20 ± 0,50
Изолейцин	15,90 ± 0,95	66,60 ± 0,61	116,60 ± 0,65	11,80 ± 0,71	25,60 ± 0,60	26,20 ± 0,72
Лейцин	18,40 ± 0,60	64,60 ± 0,50	148,30 ± 0,60	9,80 ± 0,96	24,80 ± 0,71	25,70 ± 0,87
Фенилаланин	29,30 ± 0,82	66,90 ± 0,67	181,30 ± 0,60	20,50 ± 0,96	24,30 ± 0,55	24,90 ± 0,90
Лизин	17,70 ± 0,75	35,70 ± 0,51	69,80 ± 0,71	10,50 ± 0,74	32,20 ± 0,60	33,60 ± 0,62
Сумма	849,80	1146,60*	1834,20*	606,90	1017,70*	934,40*

(в 1,5–1,9 раза), изолейцина (в 1,3–1,8 раза) по сравнению с контрольной почвой в варианте без подкормки.

В растениях отмечали высокое содержание серина по сравнению с другими аминокислотами. Так, при засолении 50 ммоль/кг NaCl количество серина составило 48,8% от общего содержания при 100 ммоль/кг NaCl 40,5%.

Подобные данные, которые отражают негативное влияние различных факторов (засоление, температура и др.) на состав аминокислот и фермента пероксидазы в листьях пшеницы, представлены в работе В.Г. Кривобочек с соавторами (2016 г.) [13].

Подкормка растений препаратами аминокислот в условиях солевого стресса способствовала повышению количества многих аминокислот.

В варианте с применением «Глутамата натрия» при хлоридном засолении в дозе 50 ммоль/кг наблюдали увеличение общей концентрации аминокислот до 1146,6 мкг/кг (в 1,3 раза) по сравнению с соответствующим вариантом без подкормки (табл. 2).

«Глутамат натрия» положительно повлиял на накопление аспарагиновой кислоты (в 16,1 раза), глутаминовой кислоты (в 9,8 раза), глутамина (в 1 раз), глицина (в 1,6 раза), аргинина (в 1,5 раза), треонина (в 1,3 раза), аланина (в 2 раза), пролина (в 2,8 раза), тирозина (в 1,5 раза), валина (в 2,6 раза), изолейцина (в 4,2 раза), лейцина (в 3,5 раза), фенилаланина (в 2,3 раза), лизина (в 2 раза). Понижение концентрации установлено для аспарагина (в 1,8 раза), серина (в 4,7 раза), гистидина (в 3,4 раза) по сравнению с соответствующим вариантом без подкормки.

В условиях повышенной концентрации солей (100 ммоль/кг NaCl) при подкормке «Глутаматом натрия» сумма аминокислот возросла до 1017,7 мкг/кг (в 1,7 раза) по сравнению с соответствующим вариантом без подкормки. В этом варианте повысилось содержание аспарагиновой кислоты (на 30,6 мкг/кг), глутаминовой кислоты (на 406,5 мкг/кг), глицина (на 10,5 мкг/кг), аргинина (на 11,8 мкг/кг), треонина (на 2 мкг/кг), аланина (на 16,5 мкг/кг), пролина (на 5,9 мкг/кг). Наивысший показатель наблюдали для глутаминовой кислоты — 41,8% от общего содержания. Выявлено снижение концентрации аспарагина (на 1 мкг/кг) по сравнению с вариантом без подкормки, серина (на 71,2 мкг/кг), глутамина (на 6,6 мкг/кг), гистидина (на 44,8 мкг/кг), тирозина (на 1,7 мкг/кг), валина (на 2 мкг/кг).

В работе Л.Н. Федоровой с соавторами (2021 г.) также представлены результаты по адаптации пробирочного материала картофеля при обработке их L-глутаминовой кислотой и L-аспарагиновой кислотой [14]. Зарубежные авторы X. Wu *et al.* (2020 г.) привели данные по устойчивости проростков томата к солевому стрессу при обработке γ -аминомасляной кислотой [15].

С применением препарата «Аминозол» в условиях засоления (50 ммоль/кг NaCl) сумма аминокислот повысилась до 1834 мкг/кг (в 2,2 раза) по сравнению с соответствующим вариантом без подкормки.

Отмечали повышение ряда аминокислот: аспарагиновой кислоты (в 1,9 раза), глутаминовой кислоты (в 1,2 раза), аспарагина (в 2,5 раза), глутамина (в 1,2 раза),

глицина (в 2,4 раза), гистидина (в 1,9 раза), аргинина (в 1,3 раза), треонина (в 3,3 раза), аланина (в 3 раза), пролина (в 1,8 раза), тирозина (в 5,2 раза), валина (в 5,8 раза), изолейцина (в 7,3 раза), лейцина (в 8 раз), фенилаланина (в 6,2 раза), лизина (в 3,9 раза). Наблюдали понижение и серина (на 86,6 мкг/кг) по сравнению с соответствующим вариантом без подкормки.

При дозе 100 ммоль/кг NaCl в варианте с подкормкой «Аминозолом» суммарное содержание аминокислот увеличилось до 934,4 мкг/кг (в 1,5 раза) по сравнению с соответствующим вариантом без подкормки. Возросла концентрация таких аминокислот, как аспарагиновая кислота (в 2,1 раза), глутаминовая кислота (в 1,1 раза), глицин (в 2,6 раза), глутамин (в 1,5 раза), гистидин (в 1,1 раза), аргинин (в 2,7 раза), треонин (в 1,4 раза), аланин (в 1,8 раза), валин (в 1,5 раза), тирозин (в 1,3 раза), изолейцин (в 2,2 раза), лейцин (в 2,6 раза), фенилаланин (в 1,2 раза), лизин (в 3,2 раза). Высокое содержание отмечали для серина (33,5% от общего содержания), низкое — для аспарагина (0,1% от общего содержания) и пролина (1,4%).

Так, обработка препаратами аминокислот в условиях засоления способствовала активизации синтеза стрессовых белков, повышающих устойчивость и адаптацию растений.

Заклучение/Conclusion

В растениях, выращенных в почве без засоления с применением препаратов, повысилась общая концентрация аминокислот на 491,1 и 647,2 мкг/кг по сравнению с вариантом без обработки. Листовая подкормка «Глутаматом натрия» способствовала увеличению содержания таких аминокислот, как глицин (на 9,1 мкг/кг), глутаминовая кислота (на 82,5 мкг/кг) и аспарагиновая кислота (22,1 мкг/кг). Обработка «Аминозолом» повышала концентрацию глицина (в 2,3 раза), гистидина (в 1,5 раза), серина (в 1,2 раза) и валина (в 3,1 раза).

Засоление почвы хлоридом натрия привело к изменениям содержания свободных аминокислот в растениях томата. Сумма свободных аминокислот увеличилась в 1,6–2,2 раза. Солевой стресс способствовал накоплению серина в растениях в 4,9–8,2 раза по сравнению с контрольной почвой.

Подкормка растений «Глутаматом натрия» при искусственном засолении почвы позволила повысить содержание глутаминовой кислоты (в 9,7–22,9 раза) и аспарагиновой кислоты (в 2,5–16,2 раза), которые отвечают за адаптацию растений к стрессовым условиям, а также участвуют в биосинтезе других аминокислот. «Аминозол» способствовал увеличению серина (в 1,3 раза), глицина (в 2,4–2,6 раза), тирозина (в 1,3–5,2 раза) и гистидина (в 1,1–1,9 раза).

Повышение содержания некоторых аминокислот в растениях при подкормке препаратами может свидетельствовать о возможности активации неспецифических защитных реакций растений в условиях искусственного засоления. Данные препараты могут быть рекомендованы для применения в условиях солевого стресса.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания № FMEG-2021-0003 (регистрационный № 121021600147-1).

FUNDING

The work was carried out within the framework of State Assignment No. FMEG-2021-0003 (registration No. 121021600147-1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яхин О.И., Лубянов А.А., Калимуллина З.Ф., Батраев Р.А. Влияние регуляторов роста на стресс-индуцируемое накопление свободных аминокислот в растениях пшеницы. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2012; (1): 38–40. <https://elibrary.ru/oyeesf>
2. Стаценко А.П., Перуанская О.Н. Накопление свободных аминокислот и морозостойкость озимой пшеницы. *Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана*. 1983; (3): 35–37.
3. Pan Y.-Q. *et al.* The Photosynthesis, Na⁺/K⁺ Homeostasis and Osmotic Adjustment of *Atriplex canescens* in Response to Salinity. *Frontiers in Plant Science*. 2016; 7: 848. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00848>
4. Pavlíková D., Zemanová V., Procházková D., Pavlík M., Száková J., Wilhelmová N. The long-term effect of zinc soil contamination on selected free amino acids playing an important role in plant adaptation to stress and senescence. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014; 100: 166–170. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.10.028>
5. Ибрагимов З.Ш. Параметры водного режима и активность антиоксидантной системы у образцов сои в условиях засухи и засоления. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2022; (2): 16–23. <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2022-2-16-23>
6. Alfosea-Simón M. *et al.* Effect of foliar application of amino acids on the salinity tolerance of tomato plants cultivated under hydroponic system. *Scientia Horticulturae*. 2020; 272: 109509. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109509>
7. Остроженкова Е.Г. Влияние хлорида натрия на прорастание семян пшеницы. Изучение метаболических профилей методом ¹HЯМР. *Современные подходы к развитию агропромышленного, химического и лесного комплексов. Проблемы, тенденции, перспективы. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Великий Новгород: Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого*. 2021; 255–259. <https://doi.org/10.34680/978-5-89896-744-4/2021.AIC.43>
8. Иванкин А.Н. и др. О механизме биостимулирования и активации развития растительных культур. *Лесной вестник*. 2018; 22(5): 5–13. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2018-5-5-13>
9. Deivanai S., Xavier R., Vinod V., Timalata K., Lim O.F. Role of Exogenous Proline in Ameliorating Salt Stress at Early Stage in Two Rice Cultivars. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*. 2011; 7(4): 157–174. <https://elibrary.ru/onzgprv>
10. Рябчинская Т.А., Зими́на Т.В. Средства, регулирующие рост и развитие растений, в агротехнологиях современного растениеводства. *Агрохимия*. 2017; (12): 62–92. <https://doi.org/10.7868/S0002188117120092>
11. Гончарова Ю.К., Харитонов Е.М., Якунина А.А., Брагина О.А. Кластеризация российских сортов риса по аминокислотному составу в связи с устойчивостью к засухе. *Рисоводство*. 2021; (3): 27–31. <https://elibrary.ru/hgecia>
12. Fierabracci V., Masiello P., Novelli M., Bergamini E. Application of amino acid analysis by high-performance liquid chromatography with phenyl isothiocyanate derivatization to the rapid determination of free amino acids in biological samples. *Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications*. 1991; 570(2): 285–291. [https://doi.org/10.1016/0378-4347\(91\)80531-G](https://doi.org/10.1016/0378-4347(91)80531-G)
13. Кривобочек В.Г., Стаценко А.П., Гураль Д.М., Курьшев И.А. Изменчивость обменных процессов в растениях пшеницы при стрессовых воздействиях. *Аграрный научный журнал*. 2016; (6): 20–23. <https://elibrary.ru/wiqjft>
14. Федорова Л.Н., Федорова Ю.Н., Макеенко К.Н. Изучение влияния L-глутаминовой кислоты и L-аспаргиновой кислоты на адаптацию пробирочного материала картофеля. *Современные тенденции в развитии АПК: технологии, качество, безопасность. Сборник материалов и докладов Международной научно-практической конференции. Великие Луки: Великолукская государственная сельскохозяйственная академия*. 2021; 81–83. <https://elibrary.ru/hbduqrq>
15. Wu X. *et al.* Gamma-aminobutyric acid (GABA) alleviates salt damage in tomato by modulating Na⁺ uptake, the GAD gene, amino acid synthesis and reactive oxygen species metabolism. *BMC Plant Biology*. 2020; 20: 465. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02669-w>

ОБ АВТОРАХ

Руфина Ринатовна Сафина¹

младший научный сотрудник отдела воспроизводства почвенного плодородия
rufina.masnavieva.63@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8267-2016>

Родион Владимирович Окунев²

кандидат биологических наук
tutinkaz@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-6927-6983>

Гулнара Фанисовна Рахманова¹

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник
gulnara_rakhmanova@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-0261-3049>

Камила Рустемовна Гарифутдинова¹

научный сотрудник лаборатории агрохимических и биохимических анализов
amiliamilka24@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6943-0779>

¹Татарский НИИ агрохимии и почвоведения — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», ул. Оренбургский тракт, 20А, Казань, 420059, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008, Россия

REFERENCES

1. Yakhin O.I., Lubyaynov A.A., Kalimullina Z.F., Batraev R.A. The effect of growth regulators on stress-induced accumulation of free amino acids in wheat plants. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2012; (1): 38–40 (In Russian). <https://elibrary.ru/oyeesf>
2. Statsenko A.P., Peruanskaya O.N. Accumulation of summary amino acids and frost resistance of winter wheat. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki Kazakhstana*. 1983; (3): 35–37 (In Russian).
3. Pan Y.-Q. *et al.* The Photosynthesis, Na⁺/K⁺ Homeostasis and Osmotic Adjustment of *Atriplex canescens* in Response to Salinity. *Frontiers in Plant Science*. 2016; 7: 848. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00848>
4. Pavlíková D., Zemanová V., Procházková D., Pavlík M., Száková J., Wilhelmová N. The long-term effect of zinc soil contamination on selected free amino acids playing an important role in plant adaptation to stress and senescence. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014; 100: 166–170. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.10.028>
5. Ibrahimova Z.Sh. Parameters of the water regime and activity of the antioxidant system in soybean samples under conditions of drought and salinization. *Legumes and Groat Crops*. 2022; (2): 16–23 (In Russian). <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2022-2-16-23>
6. Alfosea-Simón M. *et al.* Effect of foliar application of amino acids on the salinity tolerance of tomato plants cultivated under hydroponic system. *Scientia Horticulturae*. 2020; 272: 109509. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109509>
7. Ostrozhnikova E.G. The influence of sodium chloride on growth of wheat seeds. studying metabolite profiling by method ¹HNMR. *Modern approaches to the development of agro-industrial, chemical and forestry complexes. Problems, trends, prospects. Collection of proceedings of the all-Russian scientific and practical conference. Veliky Novgorod: Yaroslav-the-Wise Novgorod State University*. 2021; 255–259 (In Russian). <https://doi.org/10.34680/978-5-89896-744-4/2021.AIC.43>
8. Ivankin A.N. *et al.* About the mechanism of biosimulation and activating the development of vegetable crops. *Forestry Bulletin*. 2018; 22(5): 5–13 (In Russian). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2018-5-5-13>
9. Deivanai S., Xavier R., Vinod V., Timalata K., Lim O.F. Role of Exogenous Proline in Ameliorating Salt Stress at Early Stage in Two Rice Cultivars. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*. 2011; 7(4): 157–174. <https://elibrary.ru/onzgprv>
10. Ryabchinskaya T.A., Zimina T.V. Regulators of plant growth and development in modern technologies of crop production. *Agricultural Chemistry*. 2017; (12): 62–92 (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0002188117120092>
11. Goncharova Yu.K., Kharitonov E.M., Yakunina A.A., Bragina O.A. Clusterization of Russian rice varieties by amino acid composition in connection with resistance to drought. *Rice Growing*. 2021; (3): 27–31 (In Russian). <https://elibrary.ru/hgecia>
12. Fierabracci V., Masiello P., Novelli M., Bergamini E. Application of amino acid analysis by high-performance liquid chromatography with phenyl isothiocyanate derivatization to the rapid determination of free amino acids in biological samples. *Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications*. 1991; 570(2): 285–291. [https://doi.org/10.1016/0378-4347\(91\)80531-G](https://doi.org/10.1016/0378-4347(91)80531-G)
13. Krivobochek V.G., Statsenko A.P., Gural D.M., Kuryshv I.A. Variability of metabolic processes in wheat plants under stress. *Agrarian scientific journal*. 2016; (6): 20–23 (In Russian). <https://elibrary.ru/wiqjft>
14. Fedorova L.N., Fedorova Yu.N., Makeenko K.N. Effect of L-glutamic acid and L-asparagic acid on the adaptation of potato test tube material. *Modern trends in the development of the agro-industrial complex: technology, quality, safety. Collection of materials and reports of the International scientific-practical conference. Velikiye Luki: State Agricultural Academy of Velikiye Luki*. 2021; 81–83 (In Russian). <https://elibrary.ru/hbduqrq>
15. Wu X. *et al.* Gamma-aminobutyric acid (GABA) alleviates salt damage in tomato by modulating Na⁺ uptake, the GAD gene, amino acid synthesis and reactive oxygen species metabolism. *BMC Plant Biology*. 2020; 20: 465. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02669-w>

ABOUT THE AUTHORS

Rufina Rinatovna Safina¹

Junior Researcher at the Department of Soil Fertility Reproduction
rufina.masnavieva.63@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8267-2016>

Rodion Vladimirovich Okunev²

Candidate of Biological Sciences
tutinkaz@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-6927-6983>

Gulnara Fanisovna Rakhmanova¹

Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher
gulnara_rakhmanova@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-0261-3049>

Kamila Rustemovna Garafutdinova¹

Researcher at the Laboratory of Agrochemical and Biochemical Analyses
amiliamilka24@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6943-0779>

¹Tatar Research Institute of Agrochemistry and Soil Science is a separate structural subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science «Federal Research Center «Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», 20A Orenburgskiy trakt, Kazan, 420059, Russia

²Kazan (Volga Region) Federal University, 18 Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russia