

Морфофизиологические особенности *Allium cepa* и *Allium sativum* при выращивании «на зелень» в условиях дефицита азота

А. А. Бетехтина, А. В. Малахеева, Г. Г. Борисова, О. В. Воропаева, М. Г. Малева[✉]

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

[✉]E-mail: maria.maleva@mail.ru

Аннотация. Важнейшим направлением развития сельского хозяйства является выявление культурных растений с морфологическими параметрами корней, обеспечивающими эффективное поглощение азота из почвы. **Цель** исследования – оценка морфофизиологических особенностей и количества бактерий азотного цикла в ризосфере двух представителей рода *Allium* (*A. cepa* и *A. sativum*), выращенных «на зелень» в условиях дефицита азота. **Методы.** Изучены морфофизиологические характеристики модельных видов растений, выращенных в течение 10 недель при естественном освещении и комнатной температуре на малоплодородном субстрате как при двукратном внесении аммиачной селитры (30 мг N/kg почвы), так и в отсутствие азотного удобрения. Выполнена количественная оценка бактерий азотного цикла, выделенных из ризосферы модельных культур. **Результаты.** В условиях ограниченного азотного питания *A. cepa* и *A. sativum* характеризовались меньшей биомассой (в среднем в 3,5 раза), пониженным содержанием фотосинтетических пигментов (в 1,7 раза) и общего азота (в 1,6 раза) по сравнению с растениями, выращенными при его добавлении. Внесение N увеличивало у *A. sativum* радиус корня и стелы боковых корней, толщины паренхимы коры и числа слоев клеток в ней в отличие от *A. cepa* и способствовало его большему накоплению. В ризосфере обоих видов растений выявлено преобладание азотфиксаторов по сравнению с аммонификаторами и нитрификаторами. При этом количество денитрификаторов у *A. cepa* было в 14 раз выше по сравнению с *A. sativum*. **Научная новизна.** Впервые в условиях дефицита азота изучены анатомо-морфофизиологические особенности боковых корней *A. cepa* и *A. sativum* и выполнена количественная оценка бактерий азотного цикла в ризосфере этих культур. Выявленные структурные перестройки боковых корней *A. sativum* при ограниченном содержании азота в субстрате способствуют более эффективному поглощению и накоплению N в биомассе по сравнению с *A. cepa*.

Ключевые слова: лук репчатый, чеснок озимый, азотный цикл, биомасса растений, фотосинтетические пигменты, структура боковых корней, ризосферные бактерии

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00248, <https://rscf.ru/project/24-26-00248/>

Для цитирования: Бетехтина А. А., Малахеева А. В., Борисова Г. Г., Воропаева О. В., Малева М. Г. Морфофизиологические особенности *Allium cepa* и *Allium sativum* при выращивании «на зелень» в условиях дефицита азота // Аграрный вестник Урала. 2026. Т. 26, № 02. С. 207–220. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2026-26-02-207-220>.

Дата поступления статьи: 04.06.2025, **дата рецензирования:** 30.09.2025, **дата принятия:** 08.12.2025.

Morphophysiological features of *Allium cepa* and *Allium sativum* when grown “for greens” under conditions of nitrogen deficiency

A. A. Betekhtina, A. V. Malakheeva, G. G. Borisova, O. V. Voropaeva, M. G. Maleva 

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

 E-mail: maria.maleva@mail.ru

Abstract. The most important area of agricultural development is the identification of crop plants with root morphological parameters that ensure efficient nitrogen absorption from the soil. **The purpose** of the study was to assess the morphophysiological characteristics and the number of nitrogen cycle bacteria in the rhizosphere of two representatives of the genus *Allium* (*A. cepa* and *A. sativum*) grown "for greens" under nitrogen deficiency conditions. **Methods.** The morphophysiological characteristics of model plant species grown for 72 days under natural light and room temperature on a low-fertility substrate were studied both with double application of ammonium nitrate (30 mg N/kg of soil) and in the absence of nitrogen fertilizer. A quantitative assessment of the nitrogen cycle bacteria isolated from the rhizosphere of model crops was performed. **Results.** Under conditions of limited nitrogen nutrition, *A. cepa* and *A. sativum* were characterized by lower biomass (on average 3.5 times), reduced content of photosynthetic pigments (1.7 times) and total nitrogen (1.6 times) compared to plants grown with its addition. The introduction of N increased the radius of the root and stele of lateral roots, the thickness of the bark parenchyma and the number of cell layers in it in *A. sativum*, unlike *A. cepa*, and contributed to its greater accumulation. In the rhizosphere of both plant species, nitrogen fixers predominated compared to ammonifiers and nitrifiers. At the same time, the number of denitrifiers in *A. cepa* was 14 times higher compared to *A. sativum*. **Scientific novelty.** For the first time the anatomical and morphological features of the lateral roots of *A. cepa* and *A. sativum* were studied under nitrogen deficiency conditions, and a quantitative assessment of the nitrogen cycle bacteria in the rhizosphere of these crops was performed. The revealed structural rearrangements of the lateral roots of *A. sativum* with a limited nitrogen content in the substrate contribute to more efficient absorption and accumulation of N in the biomass compared to *A. cepa*.

Keywords: onion, winter garlic, nitrogen cycle, plant biomass, photosynthetic pigments, lateral root structure, rhizosphere bacteria

Acknowledgements. The study was supported by Russian Science Foundation grant No. 24-26-00248, <https://rscf.ru/project/24-26-00248/>

For citation: Betekhtina A. A., Malakheeva A. V., Borisova G. G., Voropaeva O. V., Maleva M. G. Morphophysiological features of *Allium cepa* and *Allium sativum* when grown "for greens" under conditions of nitrogen deficiency. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2026; 26 (02): 207–220. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2026-26-02-207-220>. (In Russ.)

Date of paper submission: 04.06.2025, **date of review:** 30.09.2025, **date of acceptance:** 08.12.2025.

Постановка проблемы (Introduction)

Азот (N) является важнейшим биофильным элементом, жизненно необходимым для роста растений, поэтому использование азотных удобрений – основная экономическая статья расходов в аграрном секторе при выращивании сельскохозяйственных культур [1–3].

Почвенный N представлен соединениями трех групп, различающимися по степени доступности для растений. К первой группе относятся минеральные соединения N, являющиеся непосредственно источниками их питания. Ко второй группе относятся легкогидролизуемые органические соединения N, минерализующиеся в первую очередь

с образованием доступных для растения форм. Основную же часть составляют негидролизуемые органические соединения, трудно поддающиеся минерализации [3; 4].

Содержание N в пахотных почвах зависит от идущих в противоположных направлениях процессов: происходит, с одной стороны, увеличение количества доступных форм за счет минерализации органических веществ, включая гумус, а также биологической фиксации атмосферного N; с другой стороны – уменьшение его количества при потреблении культурами и в результате иммобилизации, вымывания, денитрификации и фиксации почвой [4; 5].

Культурные растения используют только около 30 % N, вносимого в почву, тогда как более 60 % N почвы утрачивается в процессе выщелачивания, поверхностного стока и денитрификации [6]. В последние десятилетия наблюдается рост биогеохимического дисбаланса N в биосфере. В частности, баланс N в земледелии Российской Федерации за последние 25 лет оценивается как остродефицитный [5].

Разные виды культурных растений обычно различаются по содержанию общего N. Это связывают прежде всего с различием в протекании основных жизненных процессов – роста, выживания и размножения. В основе продукционного процесса растений лежит сопряжение воздушного и корневого питания. На основании этого можно предположить, что содержание N в листьях однодольных культурных растений так или иначе связано с особенностями в строении их корней [3; 7].

Растения поглощают и усваивают N преимущественно в нитратной (NO_3^-) и аммонийной (NH_4^+) формах, при этом в большинстве сельскохозяйственных почв NO_3^- являются преобладающими [4]. После внесения удобрений формируется высокая концентрация NH_4^+ в очаге размещения удобрений, который в аэробных условиях быстро преобразуется в NO_3^- в результате процесса нитрификации. Нитрат-ионы легко диффундируют по почвенному профилю [8]. В итоге в почве во время осадков высока вероятность перемещения NO_3^- ниже зоны питания корней, что снижает вероятность поглощения этих анионов корнями у видов с неглубокой корневой системой [9].

Лук репчатый (*Allium cepa* L.) и чеснок (*Allium sativum* L.) – важные луковичные культуры, выращиваемые в различных климатических зонах для потребления «на зелень», в качестве специй или приправ [1; 2; 10–12]. Чеснок является второй по распространенности культурой из семейства *Alliaceae* после лука [13]. Эти растения содержат много биологически активных веществ, характеризующихся антиоксидантной, антимикробной и антиканцерогенной активностью [10; 14; 15].

Одним из путей селекции культурных растений является отбор видов/сортов с признаками корней, которые обеспечивают эффективное поглощение азота [3; 8; 16], особенно в условиях его низкой доступности. К таким характеристикам относятся преимущественно анатомические признаки, которые, во-первых, могут отражать энергетические затраты на образование и поддержание поглощающих корней; во-вторых, могут быть связаны с эффективностью поглощения растворов минеральных веществ и скоростью их радиального транспорта; в-третьих, позволяют создавать эффективные взаимодействия с микроорганизмами азотного цикла. Ранее было показано, что более низкая «стоимость»

корней может быть связана с развитием аэренхимы или с уменьшением числа слоев клеток паренхимы коры [3]. Такие изменения структуры паренхимы коры корня приводят к сокращению числа живых клеток, что является важным фактором снижения затрат на дыхание [3; 7]. Показано также, что корни с редукцией числа слоев клеток паренхимы активнее осуществляют радиальный транспорт растворов минеральных веществ из-за снижения апопластического барьера [3].

Каркас корневой системы у представителей семейства *Alliaceae* образуют придаточные корни, которые закладываются на донце луковицы. На придаточных корнях закладываются боковые, которые по общей протяженности составляют наибольшую долю от совокупной длины корневой системы. Они преимущественно выполняют функцию поглощения воды и питательных веществ [17]. Внимание большинства исследователей сосредоточено на внутреннем строении придаточных корней, тогда как структура боковых корней изучена в меньшей степени, несмотря на то что они имеют большее значение для минерального питания растений. Кроме того, строение корней определяет обеспеченность ризобиома углеродсодержащими соединениями, что влияет на количество и функциональный состав микроорганизмов, однако растительно-микробные взаимодействия в данном аспекте также изучены недостаточно.

Цель исследования – выявление морфофизиологических особенностей и количественная оценка бактерий азотного цикла в ризосфере двух представителей рода *Allium* (*A. cepa* и *A. sativum*), выращенных «на зелень» в условиях N-дефицита. Изучение адаптивных способностей однодольных культур к недостатку N в связи со строением боковых корней будет способствовать целенаправленному отбору видов и сортов с корневыми системами, способными к эффективному поглощению N из почвы, что позволит смягчить последствия его дефицита.

Методология и методы исследования (Methods)

В качестве объекта исследования были выбраны два представителя рода *Allium* L.: *A. cepa* (лук репчатый, сорт На зелень) и *A. sativum* (чеснок озимый, сорт Памяти Новичкова). Растения выращивали в течение 10 недель в марте – мае 2024 года при естественном освещении и комнатной температуре на малопродуктивном субстрате (вариант «-N»). Для его приготовления была использована дерново-подзолистая почва гумусового горизонта ($\text{pH}_{\text{водн.}} = 5,7$; содержание общего азота – 0,25 %). Почву смешивали с торфом верховым нейтрализованным (производитель «Селигер-Агро», Россия), глиной и чистым речным песком в пропорции 1 : 1 : 1 : 2, по объему. Такой субстрат имел реакцию среды, близкую к нейтральной ($\text{pH}_{\text{водн.}} = 6,7$), содержание общего N – 0,15 %, содержание форм N- NO_3^- и

$N-NH_4^+$ – 0,3 и 0,04 мг/100 г, соответственно. Субстрат помещали в пластиковые вегетационные сосуды (1,2 л), в которые высаживали здоровые семена выбранных культур: *A. cerea* – 50, *A. sativum* – 25 штук. Во все сосуды однократно вносили фосфор в виде раствора монокальцийфосфата (20 мг P/кг почвы) через 14 дней после посева. Кроме того, в половину опытных образцов двукратно (с разрывом в 2 недели) вносили азот (30 мг N/кг почвы) в форме раствора аммиачной селитры (вариант «+N»). Каждый вариант был представлен тремя повторностями (3 сосуда). Полив растений производили дистиллированной водой по мере подсыхания субстрата (2–3 раза в неделю). После окончания эксперимента растения аккуратно извлекали вместе с корневой системой и отбирали ризосферную почву в стерильные полипропиленовые пробирки (типа Фалькон) для дальнейшей количественной оценки бактерий азотного цикла. Остатки ризосферного грунта высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали, просеивали через сито (диаметром 0,25 мм) и использовали для определения pH и содержания разных форм азота.

Растения отмывали от частичек почвы и разделяли на надземные и подземные органы. Пробы придаточных корней с расположенными на них боковыми корнями фиксировали в 70 -процентном этаноле для дальнейшего анализа структуры последних. Определяли общепринятый комплекс признаков, связанный с экологическими свойствами растений и дополненный оригинальными характеристиками: радиус корня, коры и стелы, площадь поперечного сечения корня и стелы, число слоев клеток паренхимы коры и встречаемость аэренхимы [18].

У растений измеряли параметры роста: длину листьев, сырую и сухую биомассу надземных и подземных органов. Высечки из свежих листьев растений использовали для определения содержания фотосинтетических пигментов. Измерение хлорофилла *a* (Хл *a*), хлорофилла *b* (Хл *b*) и каротиноидов проводили спектрофотометрически при 470, 647 и 663 нм (PD303UV Apel, Япония) после экстракции в охлажденном 80-процентном ацетоне. Содержание фотосинтетических пигментов рассчитывали так, как описано ранее [19], и выражали в мг/г сухого веса.

Для определения содержания общего N в надземной биомассе исследуемых видов часть листьев рандомно отобранных растений из каждого сосуда высушивали при 75 °C в течение 24 часов, гомогенизировали и формировали три композитных пробы. Содержание общего N в растениях и субстрате определяли спектрофотометрически при 400 нм (“APEL” PD-303UV, Япония) после мокрого озоления растительного материала смесью кислот – H_2SO_4 и $HClO_4$ (в соотношении 10 : 1 по объему)

и дальнейшей реакции с реактивом Несслера. Количество общего N в надземной биомассе растений рассчитывали в мг/г сухого веса и в мг/растение; а в воздушно-сухом субстрате – в процентах.

Содержание щелочногидролизуемого N, который характеризует содержание аммонийной формы и потенциально доступных для растений органических соединений азота, определяли в образцах субстрата путем гидролиза органических соединений почвы 1 М раствором NaOH [20]. После поглощения выделившегося аммиака (включая обменный аммоний) 5-процентным раствором борной кислоты проводили титрование стандартным раствором 0,005 М серной кислоты. Содержание $N-NO_3^-$ и $N-NH_4^+$ определяли в водной вытяжке субстрата (в соотношении 1 : 2,5; вес : объем) методом прямой потенциометрии с помощью универсального иономера (И160МИ, ООО «Измерительная техника», Россия), используя ионселективный электрод (ЭЛИС-121NH4, Россия) и хлорсеребряный электрод сравнения (ЭСр-10101/3.5K80.4, Россия). Концентрацию ионов определяли по калибровочным кривым, полученным в интервале концентрации от 10^{-5} до 10^{-1} М тестируемых ионов [21].

Общее количество азотфиксирующих бактерий в ризосфере исследуемых видов растений определяли путем последовательных посевов на агаризованную питательную среду Эшби, в составе которой отсутствовал источник N [22]. Предварительно около 1 г почвы смешивали с 9 мл стерильного 0,85-процентного раствора NaCl и встряхивали в орбитальном шейкере при 180 об/мин в течение 10 минут при 28 ± 2 °C. Для получения изолированных колоний готовили ряд последовательных разведений (коэффициент разведения – 10). Высевы на плотную питательную среду проводили с 4-го по 6-е разведение глубинным способом (по 1 мл) с каждого вегетационного сосуда (в двух повторностях). Для роста азотфиксаторов чашки Петри инкубировали при 28 ± 2 °C в термостате ТСО-1/80 СПУ (Россия) в течение 5 суток. Способность к переводу молекулярного N в аммонийный определяли по наличию обильного роста колоний и пересчитывали в колониеобразующих единицах (КОЕ) на 1 г сухой почвы.

Определение количества денитрификаторов, аммонификаторов и нитрификаторов проводили высевом почвенной суспензии в соответствующие жидкие питательные среды методом предельных разведений [22; 23]. В пробирки разливали по 9 мл среды для исследуемых физиологических групп микроорганизмов, после чего делали серию десятикратных разведений из суспензии почвы. Инкубацию засеянных пробирок проводили при температуре 28 ± 2 °C в течение 5 суток (денитрификаторы, аммонификаторы) или 14 суток (нитрификаторы). После инкубации отмечали наличие или отсутствие

роста бактерий в пробирке и составляли числовую характеристику. Наиболее вероятное число (НВЧ) клеток в 1 г сухой почвы рассчитывали по составленной числовой характеристике с использованием таблицы Мак-Креди [22].

Для определения аммонификаторов бактерии культивировали на мясопептонном бульоне, содержащем 3 % пептона. При посеве между стенкой и пробкой каждой пробирки подвешивали полоски фильтровальной и лакмусовой бумажек, смоченных 5-процентным водным раствором $Pb(CH_3COO)_2$ и $H_2O_{дист.}$ соответственно. Идентификацию аммонификаторов проводили по наличию выделяющихся газов аммиака, сероводорода и меркаптанов [22].

Количество нитрификаторов определяли на среде Виноградского (г/л): $(NH_4)_2SO_4 - 2,0$; $K_2HPO_4 - 1,0$; $MgSO_4 \times 8H_2O - 0,5$; $NaCl - 2,0$; $FeSO_4 \times 7H_2O - 0,05$; $CaCO_3 - 5,0$. Для определения количества денитрификаторов использовали модифицированную питательную среду Луриа – Бергани (LB) с добавлением $NaNO_3$ в концентрации 1 г/л. После культивирования бактерий определяли наличие нитрит- и нитрат-ионов добавлением реактива Грисса и порошка Zn [22; 23].

Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета программ MS-Excel 16.0 и Statistica 13.0 (StatSoft, Inc., США). В таблицах и на рисунках представлены средние арифметические значения и их стандартные ошибки (SE). После оценки нормальности распределения достоверность различий между вариантами оценивали с помощью критерия Тьюки (Tukey HSD-test) при $p < 0,05$. На рисунках и в таблицах разными строчными и заглавными буквами латинского алфавита обозначены достоверные различия между вариантами в диапазоне изменений каждого параметра.

Результаты (Results)

В условиях ограниченного азотного питания высота 72-дневных сеянцев *A. cerea* и *A. sativum* растений составляла в среднем 17 см, что было в 1,7 раза меньше, чем у «+N»-растений (рис. 1, а, б). При этом сырая надземная биомасса у *A. cerea* была ниже в 3,3, а у *A. sativum* – в 3,8 раза, чем у «+N»-сеянцев (рис. 1, в). Величина сырой подземной биомассы при добавлении азота увеличивалась в меньшей степени – в среднем в 2,6 раза (рис. 1, в). Сухая надземная биомасса у «-N»-растений *A. cerea* и *A. sativum* была ниже в 2,7 и в 3,8 раза, а подземная – в 5,7 и 2,7 раза соответственно по сравнению с «+N»-проростками (рис. 1, г).

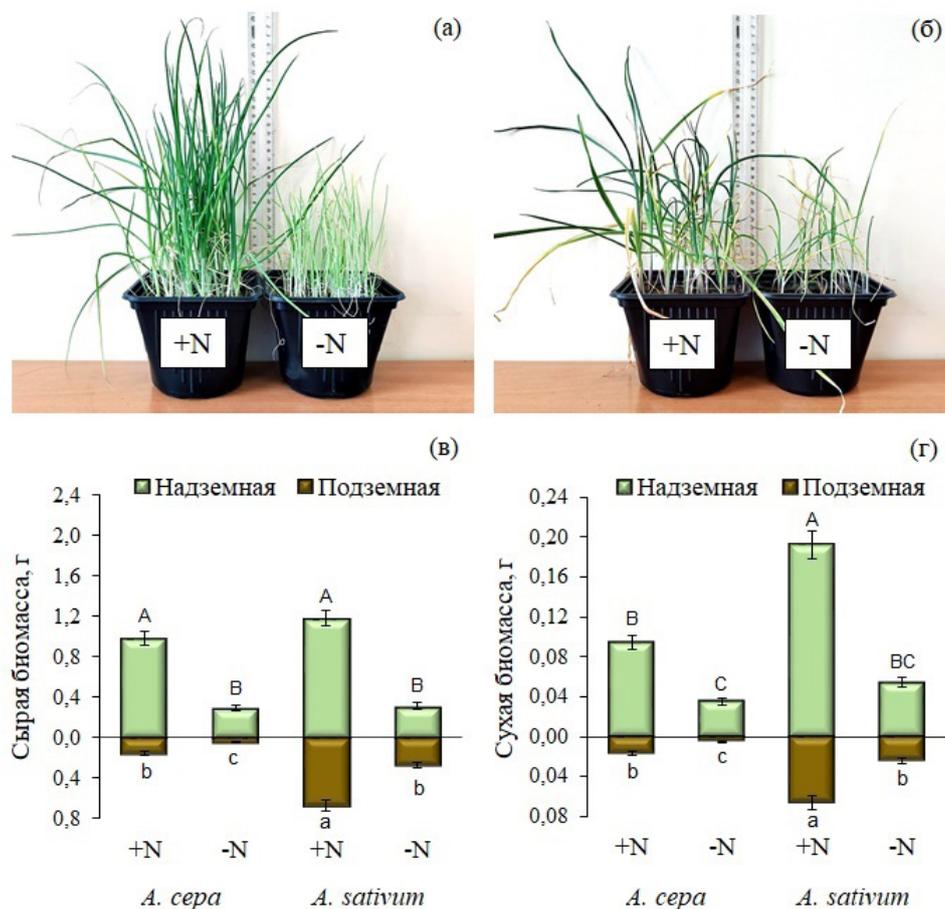


Рис. 1. Внешний вид *A. cerea* (а) и *A. sativum* (б); сырая (в) и сухая (г) биомасса растений, выращенных «на зелень» на малоплодородном субстрате с внесением (+N) и без внесения (-N) азота

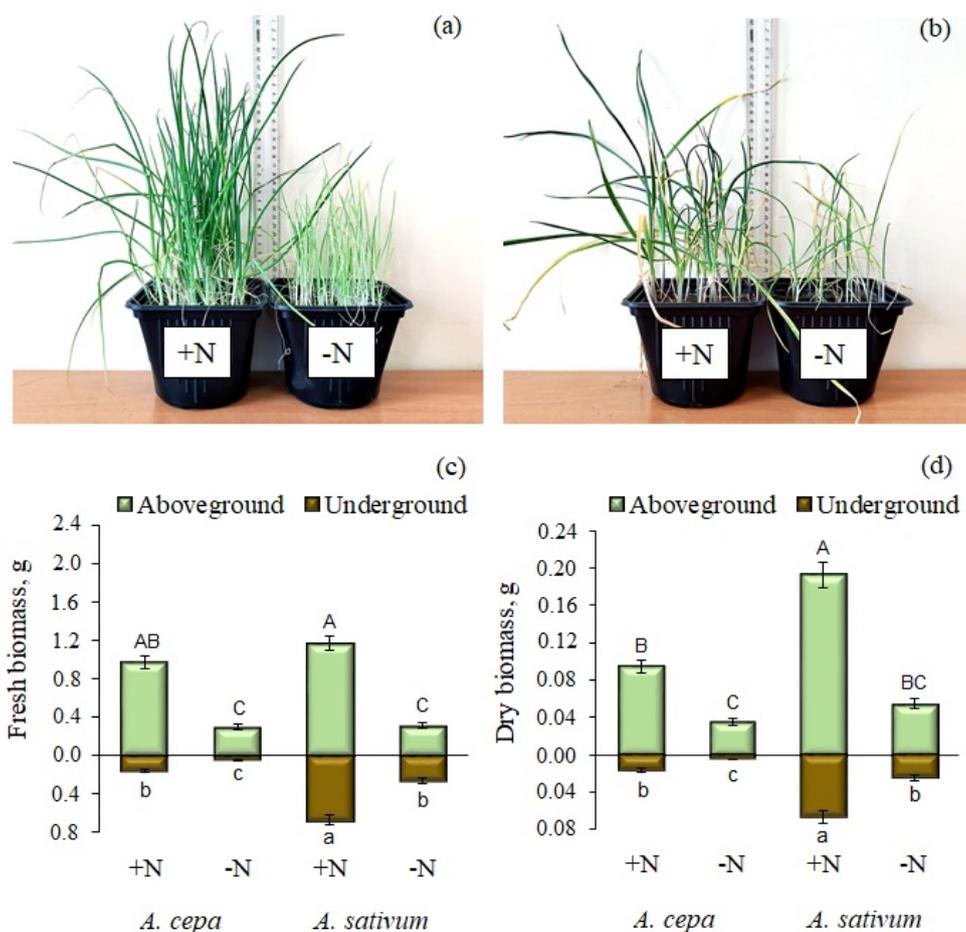


Fig. 1. External appearance of *A. cepa* (a) and *A. sativum* (b); fresh (c) and dry (d) biomass of plants grown "for greens" on a low-fertility substrate with (+N) and without (-N) nitrogen application

Таким образом, добавление азота даже в небольшом количестве вызывало однонаправленное изменение морфометрических параметров у модельных видов. Однако, несмотря на однотипные ответные реакции изученных растений на внесение азота, абсолютный прирост сухой надземной и подземной биомассы у *A. sativum* был существенно выше, чем у *A. cepa* (в 2,3 и 3,0 раза соответственно), тогда как по приросту сырой массы значимые межвидовые различия были отмечены только в отношении корней (рис. 1, в, г). В целом «+N»-сеянцы *A. sativum* по сухой надземной и подземной биомассе превосходили соответствующие параметры у «+N»-сеянцев *A. cepa* (в среднем в 3 раза). В условиях дефицита азота у *A. cepa* отношение подземной биомассы к надземной снижалось на 20 %, тогда как у *A. sativum*, напротив, увеличивалось на 30 % по сравнению с «+N»-проростками.

Добавление N в почву приводило к существенному возрастанию содержания фотосинтетических пигментов в листьях модельных видов. Наибольшее увеличение количества Хл a и Хл b наблюдалось у *A. cepa* (в среднем в 2,0 раза), тогда как у *A. sativum* оно увеличивалось в среднем в 1,5 раза (рис. 2, а).

Содержание каротиноидов в листьях *A. cepa* и *A. sativum* при N-дефиците было ниже в 1,6 и 212

1,8 раза соответственно по сравнению с «+N»-растениями (рис. 2, б). По содержанию фотосинтетических пигментов изученные виды достоверно отличались: количество хлорофиллов было выше в листьях *A. cepa* (в среднем в 1,6 раза), а каротиноидов, напротив, в листьях *A. sativum* (в 1,5 раза).

Соотношение хлорофиллов у исследуемых видов рода *Allium* достоверно не менялось и в среднем составляло 2,0 (рис. 2, в) независимо от содержания в почве N. Отношение хлорофиллов к каротиноидам у *A. cepa* при внесении N достоверно увеличивалось, что объясняется более высоким приростом содержания хлорофиллов по сравнению с каротиноидами (рис. 2, г). Для растений *A. sativum* отмечена обратная тенденция: у «+N»-растений это соотношение было выше по сравнению с «-N»-проростками.

В условиях ограниченного азотного питания содержание общего N в надземной и подземной биомассе *A. cepa* было ниже, чем у «+N»-растений, в 1,9 и 1,6 раза соответственно (таблица 1). Аналогичная тенденция была отмечена и в отношении содержания N в биомассе *A. sativum*: как в листьях, так и в корнях «-N»-растений оно было ниже в 1,3 раза по сравнению с «+N»-растениями.

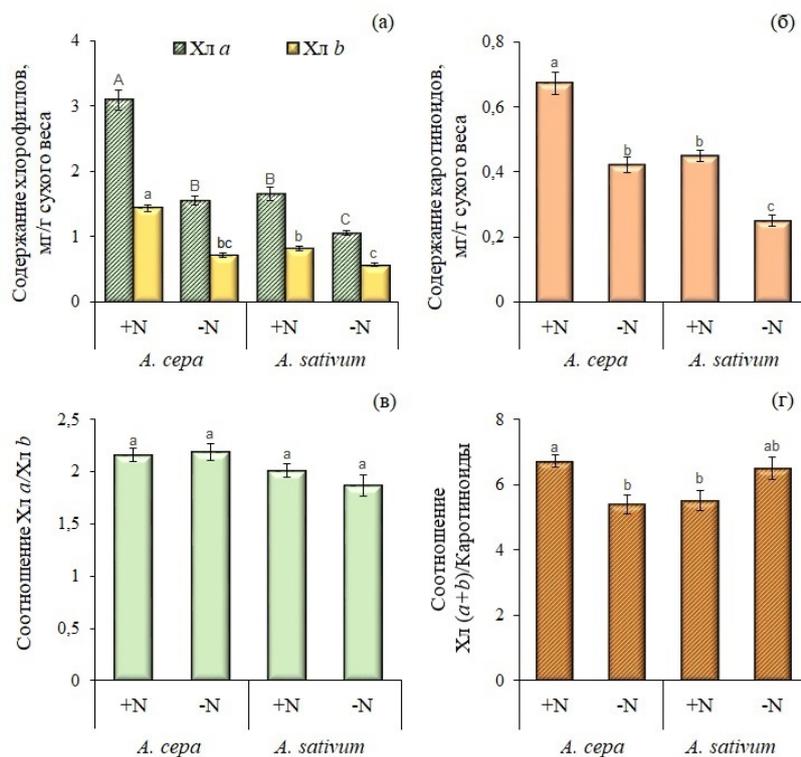


Рис. 2. Содержание хлорофиллов (а), каротиноидов (б), соотношение между хлорофиллами (в) и между хлорофиллами и каротиноидами (г) у *A. cepa* и *A. sativum*, выращенных «на зелень» на малопродуктивном субстрате с внесением (+N) и без внесения (-N) азота

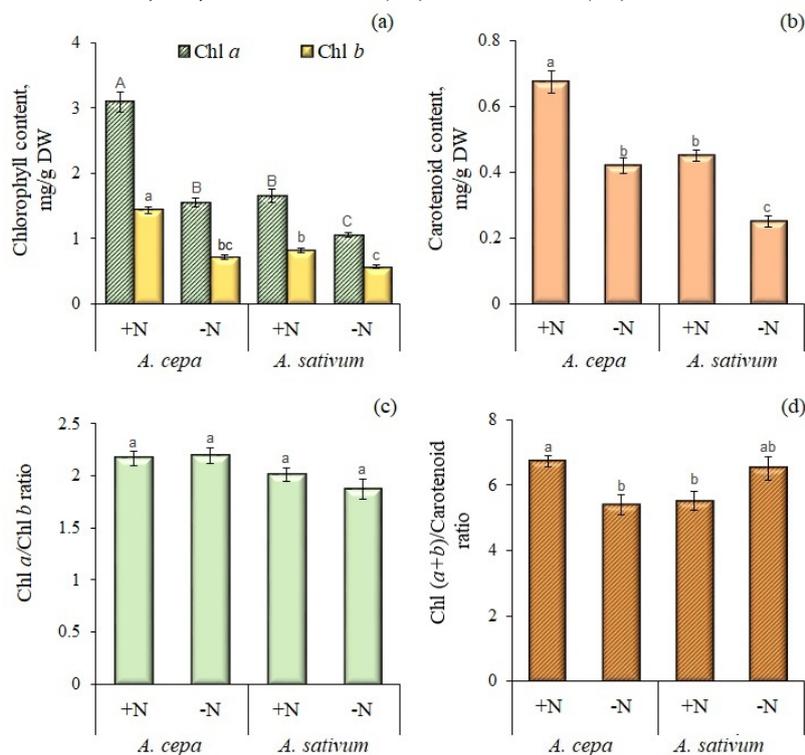


Fig. 2. The content of chlorophylls (a), carotenoids (b), the ratio between chlorophylls (c) and between total chlorophylls and carotenoids (d) in *A. cepa* and *A. sativum* grown "for greens" on a low-fertility substrate with (+N) and without (-N) nitrogen application

При этом в расчете на растение количество N в надземной и подземной биомассе у *A. cepa* и *A. sativum* было меньше, чем при внесении азотного удобрения, в среднем в 5,3 и 4,0 раза соответствен-

но, что связано как с пониженным содержанием N на единицу веса, так и с меньшей биомассой растений (таблица 1).

Таблица 1
Содержание азота в биомассе *A. cepa* и *A. sativum*, выращенных «на зелень» на малоплодородном субстрате с внесением (+N) и без внесения (-N) азота

Содержание азота		<i>A. cepa</i>		<i>A. sativum</i>	
		+N	-N	+N	-N
мг/г сухого веса	Надземная	25,06 ± 1,78 ^b	13,35 ± 0,26 ^c	31,03 ± 1,72 ^a	23,55 ± 0,76 ^b
	Подземная	23,22 ± 0,75 ^b	14,63 ± 0,15 ^d	26,99 ± 0,12 ^a	20,44 ± 0,30 ^c
мг/растение	Надземная	2,34 ± 0,39 ^b	0,47 ± 0,08 ^c	5,75 ± 0,52 ^a	1,29 ± 0,03 ^c
	Подземная	0,40 ± 0,06 ^b	0,07 ± 0,01 ^c	1,79 ± 0,29 ^a	0,50 ± 0,03 ^b

Примечание. Здесь и далее: разными надстрочными буквами латинского алфавита (^{a, b, c, d}) обозначены достоверные различия между вариантами в диапазоне изменений каждого параметра при $p < 0,05$.

Table 1
Nitrogen content in the biomass of *A. cepa* and *A. sativum* grown “for greens” on a low-fertility substrate with (+N) and without (-N) nitrogen application

Nitrogen content		<i>A. cepa</i>		<i>A. sativum</i>	
		+N	-N	+N	-N
mg/g DW	Aboveground	25.06 ± 1.78 ^b	13.35 ± 0.26 ^c	31.03 ± 1.72 ^a	23.55 ± 0.76 ^b
	Underground	23.22 ± 0.75 ^b	14.63 ± 0.15 ^d	26.99 ± 0.12 ^a	20.44 ± 0.30 ^c
mg/plant	Aboveground	2.34 ± 0.39 ^b	0.47 ± 0.08 ^c	5.75 ± 0.52 ^a	1.29 ± 0.03 ^c
	Underground	0.40 ± 0.06 ^b	0.07 ± 0.01 ^c	1.79 ± 0.29 ^a	0.50 ± 0.03 ^b

Note: Hereinafter different superscript Latin letters (^{a, b, c, d}) indicate significant differences between the treatments in the range of changes of each parameter at $p < 0.05$.

Таблица 2
Структурные характеристики боковых корней *A. cepa* и *A. sativum*, выращенных «на зелень» на малоплодородном субстрате с внесением (+N) и без внесения (-N) азота

Параметр		<i>A. cepa</i>		<i>A. sativum</i>	
		+N	-N	+N	-N
Радиус, мкм	корня	166,85 ± 4,90 ^b	155,50 ± 6,51 ^b	316,25 ± 12,82 ^a	194,42 ± 6,65 ^b
	стелы	30,27 ± 1,26 ^b	25,08 ± 2,30 ^b	53,46 ± 2,36 ^a	25,50 ± 1,01 ^b
Доля стелы в площади поперечного сечения корня, %		3,32 ± 0,14 ^a	2,88 ± 0,36 ^a	3,01 ± 0,17 ^a	1,99 ± 0,18 ^b
Толщина паренхимы коры, мкм		79,24 ± 3,53 ^c	89,75 ± 5,72 ^c	200,87 ± 10,98 ^a	129,92 ± 5,11 ^b
Число слоев паренхимы коры, шт.		3,33 ± 0,09 ^b	3,01 ± 0,08 ^b	7,48 ± 0,29 ^a	3,90 ± 0,1 ^b

Table 2
Structural characteristics of lateral roots of *A. cepa* and *A. sativum* grown “for greens” on low-fertility substrate with (+N) and without (-N) nitrogen application

Parameter		<i>A. cepa</i>		<i>A. sativum</i>	
		+N	-N	+N	-N
Radius, μm	root	166.85 ± 4.90 ^b	155.50 ± 6.51 ^b	316.25 ± 12.82 ^a	194.42 ± 6.65 ^b
	stela	30.27 ± 1.26 ^b	25.08 ± 2.30 ^b	53.46 ± 2.36 ^a	25.50 ± 1.01 ^b
The stela proportion in the root cross-sectional area, %		3.32 ± 0.14 ^a	2.88 ± 0.36 ^a	3.01 ± 0.17 ^a	1.99 ± 0.18 ^b
Thickness of cortex parenchyma, μm		79.24 ± 3.53 ^c	89.75 ± 5.72 ^c	200.87 ± 10.98 ^a	129.92 ± 5.11 ^b
Number of layers of cortex parenchyma, pcs.		3.33 ± 0.09 ^b	3.01 ± 0.08 ^b	7.48 ± 0.29 ^a	3.90 ± 0.1 ^b

Следует отметить межвидовые различия по содержанию N в надземной биомассе: в листьях *A. sativum* его количество было выше, чем у *A. cepa*, в среднем в 1,5 раза, а в корнях – в 1,3 раза. В расчете на растение с учетом как надземной, так и подземной биомассы содержание азота у *A. sativum* было в среднем в 3 раза выше по сравнению с *A. cepa* (таблица 1).

У *A. cepa* радиусы корня и стелы в условиях N-дефицита достоверно не отличались от этих параметров «+N»-растений, тогда как у *A. sativum* снижались в 1,6 и в 2,1 раза соответственно (табли-

ца 2). Доля стелы в площади поперечного сечения корня у модельных «-N»-растений в среднем составляла 2,4 % и возросла до 3,2 % при внесении N. При этом минимальным значением отличались «-N»-проростки *A. sativum* (таблица 2). Толщина паренхимы коры у «-N»- и «+N»-растений *A. cepa* достоверно не отличалась, в то время как у *A. sativum* в условиях ограниченного азотного питания была ниже, чем при добавлении N (на 55 %). При этом число слоев паренхимы у *A. cepa* достоверно не менялось, тогда как у *A. sativum* было почти в 2 раза ниже, чем у «+N»-растений. В корнях всех модель-

ных растений были обнаружены аэренхима и утолщенная экзодерма.

Анализ количества бактерий, выполняющих разные функции в биогеохимическом цикле N, в ризосфере исследуемых видов, показал значимое преобладание во всех вариантах азотфиксаторов по сравнению с аммонификаторами и нитрификаторами (таблица 3). При этом наблюдалась тенденция к увеличению их количества при внесении N (в среднем в 3,5 раза). В субстрате без растений количество азотфиксаторов было на порядок ниже, чем после выращивания растений (таблица 3).

Количество денитрификаторов в ризосфере *A. cepa* было в 14 раз выше по сравнению с *A. sativum* и почти в 6 раз выше, чем в субстрате без растений (таблица 3).

Количество щелочногидролизуемого N в среднем составляло 5 % от общего (таблица 4). Доля N-NH₄⁺ от щелочногидролизуемого N составляла в среднем 0,2 % под растениями и 0,5 % – без растений, тогда как остальное его количество было представлено N легкогидролизуемых органических соединений. Содержание N-NO₃⁻ в почве доминировало над N-NH₄⁺: после выращивания растений оно было выше в среднем в 60 раз. При этом внесение аммонийной селитры (суммарно 60 мг N/кг субстрата) значимо на количестве и соотношении этих минеральных форм N не отразилось, что свя-

зано с активным потреблением этого элемента растениями. В субстрате без растений в условиях N-дефицита количество N-NO₃⁻ было таким же, как в вариантах с растениями. Однако при внесении азотного удобрения оно было в 14 раз выше по сравнению с вариантами с растениями, что указывает на их ключевую роль в N-потреблении.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Эффективное поглощение и усвоение азота относятся к важнейшим процессам, определяющим жизнедеятельность и продуктивность растений [1; 4]. Азот – составная часть всех аминокислот, белков, нуклеотидов, фосфолипидов, хлорофилла и других важных биомолекул [2; 3]. Азотное голодание растений в молодом возрасте вызывает слабое развитие ассимилирующей поверхности и отставание их в росте [4]. В условиях недостаточного азотного питания как надземная, так и подземная биомасса модельных сеянцев *A. cepa* и *A. sativum* была существенно ниже, чем при его внесении. Аналогичные результаты были получены и другими авторами при изучении продукционного процесса у этих видов в зависимости от обеспеченности азотом [1; 2; 11]. Согласно исследованиям, усиленный рост растений может быть обусловлен прямой ролью N в качестве важнейшего структурного компонента, необходимого для синтеза аминокислот, а следовательно, и белков [1].

Таблица 3

Количество бактерий азотного цикла в ризосфере *A. cepa* и *A. sativum*, выращенных «на зелень» на малоплодородном субстрате с внесением (+N) и без внесения (-N) азота

Вариант	Внесение N	¹ Азот-фиксаторы, ×10 ⁶ КОЕ/г сухой почвы	² Аммонификаторы, ×10 ⁶ НВЧ/г сухой почвы	² Нитрификаторы, ×10 ³ НВЧ/г сухой почвы	² Денитрификаторы, ×10 ⁶ НВЧ/г сухой почвы
<i>A. cepa</i>	+N	10,71 ± 0,44 ^a	0,2	0,025–15,0	7,5
	-N	6,88 ± 0,08 ^{ab}	1,5	0,045–1,50	9,5
<i>A. sativum</i>	+N	5,80 ± 0,54 ^{ab}	0,45	0,025–9,50	0,25
	-N	1,09 ± 0,02 ^{bc}	0,75	0,009–4,50	0,95
Субстрат без растений	+N	0,68 ± 0,06 ^c	0,75	0,045–0,95	1,5
	-N	0,61 ± 0,03 ^c	0,75	0,040–0,95	1,5

Примечание. ¹ Среднеарифметическое значение ± SE (n = 6); разными надстрочными буквами латинского алфавита обозначены достоверные различия между вариантами при p < 0,05. ² Наиболее вероятное число (MPN) ризобактерий, рассчитанное на основе четырех независимых разведений.

Table 3

The number of nitrogen cycle bacteria in the rhizosphere of *A. cepa* and *A. sativum* grown “for greens” on a low-fertility substrate with (+N) and without (-N) nitrogen application

Variant	N application	¹ Nitrogen-fixing, ×10 ⁶ SFU/g of dry soil	² Ammonifying, ×10 ⁶ MPN/g of dry soil	² Nitrifying, ×10 ³ MPN/g of dry soil	² Denitrifying, ×10 ⁶ MPN/g of dry soil
<i>A. cepa</i>	+N	10.71 ± 0.44 ^a	0.2	0.025–15.0	7.5
	-N	6.88 ± 0.08 ^{ab}	1.5	0.045–1.50	9.5
<i>A. sativum</i>	+N	5.80 ± 0.54 ^{ab}	0.45	0.025–9.50	0.25
	-N	1.09 ± 0.02 ^b	0.75	0.009–4.50	0.95
Unplanted substrate	+N	0.68 ± 0.06 ^c	0.75	0.045–0.95	1.5
	-N	0.61 ± 0.03 ^c	0.75	0.040–0.95	1.5

Note. ¹ Mean value ± SE (n = 6); different superscript Latin letters indicate significant differences between the treatments in the range of changes of each parameter at p < 0.05. ² Most probable number (MPN) of rhizobacteria calculated based on four independent dilutions.

Таблица 4

Содержание разных форм азота в субстрате после эксперимента

Вариант	Внесение N	Общий N, %	Щелочно-гидролизуемый N, мг/100 г почвы	N-NO ₃ ⁻ , мг/100 г почвы	N-NH ₄ ⁺ , мг/100 г почвы
<i>A. cepa</i>	+N	0,19 ± 0,01 ^a	10,45 ± 1,05 ^a	0,93 ± 0,02 ^b	0,017 ± 0,002 ^c
	-N	0,18 ± 0,00 ^a	8,55 ± 0,19 ^a	0,93 ± 0,02 ^b	0,013 ± 0,001 ^d
<i>A. sativum</i>	+N	0,19 ± 0,00 ^a	9,20 ± 0,35 ^a	0,98 ± 0,03 ^b	0,018 ± 0,002 ^c
	-N	0,19 ± 0,01 ^a	9,19 ± 0,21 ^a	0,92 ± 0,02 ^b	0,017 ± 0,001 ^{cd}
Субстрат без растений	+N	0,18 ± 0,01 ^a	8,90 ± 0,41 ^a	13,64 ± 0,55 ^a	0,045 ± 0,003 ^a
	-N	0,16 ± 0,00 ^a	8,73 ± 0,19 ^a	0,90 ± 0,04 ^b	0,033 ± 0,001 ^b

Table 4

The content of different nitrogen forms in substrate after the experiment

Variant	N application	Total N, %	Alkaline hydrolysable N, mg/100 g of soil	N-NO ₃ ⁻ , mg/100 g of soil	N-NH ₄ ⁺ , mg/100 g of soil
<i>A. cepa</i>	+N	0.19 ± 0.01 ^a	10.45 ± 1.05 ^a	0.93 ± 0.02 ^b	0.017 ± 0.002 ^c
	-N	0.18 ± 0.00 ^a	8.55 ± 0.19 ^a	0.93 ± 0.02 ^b	0.013 ± 0.001 ^c
<i>A. sativum</i>	+N	0.19 ± 0.00 ^a	9.20 ± 0.35 ^a	0.98 ± 0.03 ^b	0.018 ± 0.002 ^c
	-N	0.19 ± 0.01 ^a	9.19 ± 0.21 ^a	0.92 ± 0.02 ^b	0.017 ± 0.001 ^c
Unplanted substrate	+N	0.18 ± 0.01 ^a	8.90 ± 0.41 ^a	13.64 ± 0.55 ^a	0.045 ± 0.003 ^a
	-N	0.16 ± 0.00 ^a	8.73 ± 0.19 ^a	0.90 ± 0.04 ^b	0.033 ± 0.001 ^b

Существенное возрастание содержания хлорофиллов в листьях модельных видов при добавлении N объясняется прежде всего тем, что он является составной частью зеленых пигментов. Следует отметить, что при дополнительном внесении N в субстрат в нашем исследовании существенно повышалось и количество каротиноидов. Содержание каротиноидов у *A. cepa* в «-N»-варианте соответствовало литературным данным, полученным на других восьми видах лука [14], тогда как у «+N»-сеянцев оно было в 1,7 раза выше. Известно, что каротиноиды являются не только вспомогательными фотосинтетическими пигментами, но и важными фотопротекторами, защищающими молекулы хлорофилла от окисления. Положительное влияние азотного удобрения на количество хлорофиллов и каротиноидов было отмечено ранее на других культурах [19; 24].

Известно, что корни разных видов растений существенно различаются по способности к поглощению и ассимиляции N. Культуры с более высокой интенсивностью «захвата» N будут более продуктивными в агроэкосистемах при ограниченном внесении удобрений [7].

Содержание общего N в растениях может сильно варьировать в зависимости от обеспеченности почвы этим биофильным элементом. Так, например, имеются данные, что содержание N в листьях *A. cepa* в зависимости от его количества в субстрате изменялось от 2,0 до 3,9 % от сухой массы [25]. В нашем случае также внесение азотного удобрения, даже в относительно небольшом количестве, повлекло за собой почти двукратное увеличение содержания N в надземной биомассе. Отмечено, 216

что разные сорта чеснока могут существенно отличаться по количеству N в листьях в зависимости от сорта погодных условий: оно варьировало от 1,5 до 5,7 % от сухой массы [15]. В целом полученные нами данные по содержанию N в надземной биомассе модельных растений соответствуют данным других авторов [15; 25].

Особенности биогеохимического цикла азота послужили предметом многочисленных исследований, выявивших необычайную сложность этого вопроса [5; 7]. Резервным фондом для круговорота N является атмосфера. Растениям недоступен огромный запас газообразного атмосферного N, поэтому вопрос о превращениях соединений азота в почве под воздействием микроорганизмов привлекает к себе большое внимание. Большинство таких превращений осуществляется путем нитрификации, денитрификации, аммонификации, иммобилизации и азотфиксации [4]. Ризосферные бактерии обладают потенциалом стимулирования роста растений за счет увеличения доступности минеральных элементов и других механизмов, поэтому можно предположить, что микробиом ризосферы является перспективным путем для облегчения поглощения питательных веществ в условиях абиотического стресса у сельскохозяйственных культур [3; 16]. Количество денитрификаторов в ризосфере *A. cepa* примерно соответствовало количеству азотфиксаторов, но при этом было на порядок выше, чем в ризосфере *A. sativum*, что, вероятно, могло негативно влиять на накопление N в биомассе сеянцев лука.

Исследования показали, что оба представителя рода *Allium* имели общий план строения корневой системы и внутренней структуры поглощающих

корней, однако различались по комплексу количественных признаков и по реакции на добавление N. В условиях N-дефицита строение боковых корней у *A. sativum* в отличие от *A. cepa* изменялось: их диаметр существенно уменьшался, в основном за счет изменения размеров стелы и количества слоев паренхимы. В боковых корнях *A. sativum* основную часть коры составляли хорошо развитые аэренхимные полости, из-за этого на метаболически активные паренхимные клетки приходилась малая доля объема корня, что является одним из факторов уменьшения энергетических затрат на рост и поддержание корней. Известно также, что меньшее число слоев клеток способствует более активному радиальному транспорту веществ в стелу корня [3]. Кроме того, более тонкие корни обуславливают высокое отношение поверхности к объему, которое влияет на интенсивность поглощения минеральных веществ.

У *A. cepa* радиус корня, стелы, толщина паренхимы коры и число слоев клеток в коре достоверно не менялись в зависимости от внесения N. Возможно, у этого вида в отличие от *A. sativum* в услови-

ях низкой N-обеспеченности изменяются другие характеристики корня – ультраструктурные и/или биохимические, как показано для других видов культурных растений [3; 7].

Таким образом, изученные виды в условиях недостаточного обеспечения азотом отличались снижением биомассы, содержания фотосинтетических пигментов и общего N. Они также имели разные структурные механизмы адаптации к ограниченному количеству N. Корни *A. sativum* сильнее изменялись в ответ на N-дефицит, что проявлялось в снижении размеров боковых корней, стелы и коры, уменьшении числа слоев клеток в коре, однако при этом накапливали значительно больше N в сравнении с *A. cepa* и более эффективно обеспечивали его перенос в надземную биомассу. Накоплению N в биомассе *A. sativum* также способствовало меньшее количество денитрификаторов в его ризосфере. Выявление видов и сортов с корневыми системами, которые эффективно поглощают N из почвы, обеспечит экономические и экологические преимущества в условиях дисбаланса азотного цикла.

Библиографический список

1. Amare G. Review on mineral nutrition of onion (*Allium cepa* L.) // The Open Biotechnology Journal. 2020. Vol. 14. Pp. 134–144. DOI: 10.2174/1874070702014010134.
2. Geisseler D., Soto Ortiz R. S., Diaz J. Nitrogen nutrition and fertilization of onions (*Allium cepa* L.) – a literature review // Scientia Horticulturae. 2022. Vol. 291. Article number 110591. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110591.
3. Lynch J. P., Galindo-Castañeda T., Schneider H. M., Sidhu J. S., Rangarajan H., York L. M. Root phenotypes for improved nitrogen capture // Plant and Soil. 2024. Vol. 502. Pp. 31–85. DOI: 10.1007/s11104-023-06301-2.
4. Филиппова Л. С. Круговорот азота и его соединений в почве // Международный исследовательский журнал. 2023. Вып. 8 (134). С. 1–5.
5. Кудеяров В. Н. Эмиссионный фактор закиси азота при применении азотных удобрений в земледелии России // Агрохимия. 2021. № 11. С. 3–15. DOI: 10.31857/S0002188121110089.
6. Robertson G. P., Vitousek P. M. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource // Annual Review of Environment and Resources. 2009. Vol. 34. Pp. 97–125. DOI: 10.1146/annurev.enviro.032108.105046.
7. Lynch J. P., Strock C. F., Schneider H. M., Sighu J. S., Ajmera I., Galindo-Castañeda T., Klein S. P., Hanlon M. T. Root anatomy and soil resource capture // Plant and Soil. 2021. Vol. 466. Pp. 21–63. DOI: 10.1007/s11104-021-05010-y.
8. Вольнкина О. В., Копылов А. Н. Миграция нитратного азота по профилю почвы // Агрохимия. 2024. № 4. С. 3–7.
9. Brewster J. L. Onions and other vegetable Alliums. Wallingford, UK: CABI International, 2008. 455 p. DOI: 10.1017/S0014479708007199.
10. Amarakoon S., Jayasekara J. A review on garlic (*Allium sativum* L.) as a functional food // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 2017. Vol. 6. Pp. 1777–1780.
11. Redy N., Shiferaw A. Growth and yield of onion (*Allium cepa* L.) as affected by variable rates of poultry manure and mineral nitrogen fertilizer at Alage, Central Rift Valley Ethiopia // American Journal of Life Sciences. 2024. Vol. 12 (3). Pp. 44–56. DOI: 10.11648/j.ajls.20241203.11.
12. Popławska N. A., Śliz J., Skorupska M., Czeczotka M. J., Woźniak K. Garlic (*Allium sativum* L.): a review of varied health benefits // Journal of Education, Health and Sport. 2024. Vol. 72. Article number 51512. DOI: 10.12775/JEHS.2024.72.51512.
13. Yadav R. N., Bairwa H. L., Gurjar M. K. Response of garlic (*Allium sativum* L.) to organic manures and fertilizers // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2017. Vol. 6 (10). Pp. 4860–4867. DOI: 10.20546/ijemas.2017.610.454.

14. Кукушкина Т. А., Фомина Т. И. Содержание биологически активных веществ в зеленой массе многолетних луков (*Allium L.*) // Аграрный вестник Урала. 2021. № 04 (207). С. 85–92. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-207-04-85-92.
15. Кохтенкова И. Г. Сравнительная характеристика сортообразцов чеснока озимого (*Allium sativum L.*) по биохимическим показателям // Овощеводство. 2020. Т. 28. С. 52–59.
16. Galindo-Castañeda T., Lynch J. P., Six J., Hartmann M. Improving soil resource uptake by plants through capitalizing on synergies between root architecture and anatomy and root-associated microorganisms // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article number 827369. DOI: 10.3389/fpls.2022.827369.
17. Kirk G. J. D. Rice root properties for internal aeration and efficient nutrient acquisition in submerged soil // *New Phytologist*. 2003. Vol. 159. Pp. 185–194. DOI: 10.1046/j.14698137.2003.00793.x.
18. Betekhtina A. A., Tukova D. E., Veselkin D. V. Root structure syndromes of four families of monocots in the Middle Urals // *Plant Diversity*. 2023. Vol. 45 (6). Pp. 722–731. DOI: 10.1016/j.pld.2023.01.007.
19. Борисова Г. Г., Воропаева О. В., Малева М. Г., Кумар А., Трипти. Оценка ростостимулирующих свойств ризобактерий *Bacillus* sp. и их влияние на морфофизиологические характеристики рапса // Аграрный вестник Урала. 2023. № 07 (236). С. 2–13. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-236-07-2-13.
20. Dodor D. E., Kamara M. S., Asamoah-Bediako A., Adiku S. G. K., MacCarthy D. S., Kumahor S. K., Neina D. Evaluation of alkaline hydrolyzable organic nitrogen as an index of nitrogen mineralization potential of some coastal savannah soils of Ghana // *Nitrogen*. 2022. Vol. 3. Pp. 652–662. DOI: 10.3390/nitrogen3040043.
21. Tugbaeva A. S., Ermoshin A. A., Shiryaev G. I., Kiseleva I. S. Microbiome of the soil and rhizosphere of the halophyte *Spergularia marina* (L.) Griseb in the Saline Sites of Lake Kurgi, the South Urals: Metagenomic Analysis // *Microbiology Research*. 2025. Vol. 16 (3). Article number 64. DOI: 10.3390/microbiolres16030064.
22. Нетрусов А. И., Егорова М. А., Захарчук Л. М., Колотилова Н. Н. Практикум по микробиологии: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Москва: Издательский центр «Академия», 2005. 608 с.
23. Muratova A., Hübner T., Narula N., Wand H., Turkovskaya O., Kusch P., Jahn R., Merbach W. Rhizosphere microflora of plants used for the phytoremediation of bitumen-contaminated soil // *Microbiology Research*. 2003. Vol. 158 (2). Pp. 151–161. DOI: 10.1078/0944-5013-00187.
24. Борисова Г. Г., Воропаева О. В., Малева М. Г., Лыкова О. В. Биоудобрения на основе силикатных бактерий повышает продуктивность почв и культурных растений (на примере *Brassica juncea* (L.) Czern.) // Субтропическое и декоративное садоводство. 2022. № 80. С. 140–151. DOI: 10.31360/2225-3068-2022-80-140-151.
25. Черкашина М. И., Алимгафаров Р. Р., Кузнецов И. Ю., Черкашина А. Г. Химический состав и урожайность лука репчатого в связи с условиями питания // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2023. Т. 17, № 1. С. 30–39. DOI: 10.22450/19996837_2023_1_30.

Об авторах:

Анна Анатольевна Бетехтина, кандидат биологических наук, доцент департамента наук о Земле и космосе, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-5388-6007, AuthorID 132664. *E-mail: A.A.Betekhtina@urfu.ru*

Алина Васильевна Малахеева, аспирант департамента наук о Земле и космосе, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина; ORCID 0009-0002-0056-1054, AuthorID 1195211. *E-mail: alina.malakheeva@gmail.com*

Галина Григорьевна Борисова, доктор географических наук, профессор кафедры экспериментальной биологии и биотехнологий, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина; ORCID 0000-0001-6663-9948, AuthorID 64374. *E-mail: G.G.Borisova@urfu.ru*

Ольга Викторовна Воропаева, ассистент кафедры экспериментальной биологии и биотехнологий, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина; ORCID 0000-0002-5055-797X, AuthorID 1124917. *E-mail: olga.voropaeva@urfu.ru*

Мария Георгиевна Малева, кандидат биологических наук, доцент кафедры экспериментальной биологии и биотехнологий, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина; ORCID 0000-0003-1686-6071, AuthorID 152548. *E-mail: maria.maleva@mail.ru*

References

1. Amare G. Review on mineral nutrition of onion (*Allium cepa L.*). *The Open Biotechnology Journal*. 2020; 14: 134–144. DOI: 10.2174/1874070702014010134.
2. Geissler D., Soto Ortiz R. S., Diaz J. Nitrogen nutrition and fertilization of onions (*Allium cepa L.*) – a literature review. *Scientia Horticulturae*. 2022; 291: 110591. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110591.

3. Lynch J. P., Galindo-Castañeda T., Schneider H. M., Sidhu J. S., Rangarajan H., York L. M. Root phenotypes for improved nitrogen capture. *Plant and Soil*. 2024; 502: 31–85. DOI: 10.1007/s11104-023-06301-2.
4. Filippova L. S. Nitrogen cycling and nitrogen compounds in the soil. *International Research Journal*. 2023; 8 (134): 1–5. (In Russ.)
5. Kudayarov V. N. Nitrous oxide emission factor from Russian arable soils at the fertilizers application. 2021; 11: 3–15. DOI: 10.31857/S0002188121110089. (In Russ.)
6. Robertson G. P., Vitousek P. M. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource. *Annual Review of Environment and Resources*. 2009; 34: 97–125. DOI: 10.1146/annurev.environ.032108.105046.
7. Lynch J. P., Strock C. F., Schneider H. M., Sighu J. S., Ajmera I., Galindo-Castañeda T., Klein S. P., Hanlon M. T. Root anatomy and soil resource capture. *Plant and Soil*. 2021; 466: 21–63. DOI: 10.1007/s11104-021-05010-y.
8. Volynkina O. V., Kopylov A. N. Migration of nitrate nitrogen by soil profile. *Agrochemistry*. 2024; 4: 3–7. (In Russ.)
9. Brewster J. L. *Onions and other vegetable Alliums*. Wallingford, UK: CABI International, 2008. 455 p. DOI: 10.1017/S0014479708007199.
10. Amarakoon S., Jayasekara J. A review on garlic (*Allium sativum* L.) as a functional food. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2017; 6 (6): 1777–1780.
11. Redy N., Shiferaw A. Growth and yield of onion (*Allium cepa* L.) as affected by variable rates of poultry manure and mineral nitrogen fertilizer at Alage, Central Rift Valley Ethiopia. *American Journal of Life Sciences*. 2024; 12 (3): 44–56. DOI:10.11648/j.ajls.20241203.11.
12. Popławska N. A., Śliz J., Skorupska M., Czacotka M. J., Woźniak K. Garlic (*Allium sativum* L.): A review of varied health benefits. *Journal of Education, Health and Sport*. 2024; 72: 51512. DOI:10.12775/JEHS.2024.72.51512.
13. Yadav R. N., Bairwa H. L., Gurjar M. K. Response of garlic (*Allium sativum* L.) to organic manures and fertilizers. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017; 6 (10): 4860–4867. DOI: 10.20546/ijcmas.2017.610.454.
14. Kukushkina T. A., Fomina T. I. The content of biologically active substances in the green biomass of perennial onions (*Allium* L.). *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021; 04 (207): 85–92. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-207-04-85-92. (In Russ.)
15. Kokhtenkova I. G. Comparative characteristic of samples of winter garlic (*Allium sativum* L.) by biochemical indicators. *Vegetable Growing*. 2020; 28: 52–59. (In Russ.)
16. Galindo-Castañeda T., Lynch J. P., Six J., Hartmann M. Improving soil resource uptake by plants through capitalizing on synergies between root architecture and anatomy and root-associated microorganisms. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13: 827369. DOI: 10.3389/fpls.2022.827369.
17. Kirk G. J. D. Rice root properties for internal aeration and efficient nutrient acquisition in submerged soil. *New Phytologist*. 2003; 159: 185–194. DOI: 10.1046/j.14698137.2003.00793.x.
18. Betekhtina A. A., Tukova D. E., Veselkin D. V. Root structure syndromes of four families of monocots in the Middle Urals. *Plant Diversity*. 2023; 45 (6): 722–731. DOI: 10.1016/j.pld.2023.01.007.
19. Borisova G. G., Voropaeva O. V., Maleva M. G., Kumar A., Tripti. Evaluation of the growth-promoting attributes of rhizobacteria *Bacillus* sp. and their influence on the morphophysiological characteristics of rapeseed. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023; 07 (236): 2–13. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-236-07-2-13. (In Russ.)
20. Dodor D. E., Kamara M. S., Asamoah-Bediako A., Adiku S. G. K., MacCarthy D. S., Kumahor S. K., Neina D. Evaluation of alkaline hydrolyzable organic nitrogen as an index of nitrogen mineralization potential of some coastal savannah soils of Ghana. *Nitrogen*. 2022; 3: 652–662. DOI: 10.3390/nitrogen3040043.
21. Tugbaeva A. S., Ermoshin A. A., Shiryayev G. I., Kiseleva I. S. Microbiome of the soil and rhizosphere of the halophyte *Spergularia marina* (L.) Griseb in the Saline Sites of Lake Kurgi, the South Urals: metagenomic analysis. *Microbiology Research*. 2025; 16 (3): 64. DOI: 10.3390/microbiolres16030064.
22. Netrusov A. I., Egorova M. A., Zakharchuk L. M., Kolotilova N. N. *Microbiology workshop: a textbook for students of higher education institutions*. Moscow: Publishing Center “Academy”, 2005. 608 p. (In Russ.)
23. Muratova A., Hübner T., Narula N., Wand H., Turkovskaya O., Kusch P., Jahn R., Merbach W. Rhizosphere microflora of plants used for the phytoremediation of bitumen-contaminated soil. *Microbiology Research*. 2003; 158 (2): 51–161. DOI: 10.1078/0944-5013-00187.
24. Borisova G. G., Voropaeva O. V., Maleva M. G., Lykova O. V. Biofertilizer based on silicate bacteria increases the productivity of soils and cultivated plants (on the example of *Brassica juncea* (L.) Czern.). *Subtropical and Ornamental Horticulture*. 2022; 80: 140–151. DOI: 10.31360/2225-3068-2022-80-140-151. (In Russ.)
25. Cherkashina M. I., Alimgafarov R. R., Kuznetsov I. Yu., Cherkashina A. G. The chemical composition and yield of onion in connection with nutritional conditions. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2023; 17 (1): 30–39. DOI: 10.22450/19996837_2023_1_30. (In Russ.)

Authors' information:

Anna A. Betekhtina, candidate of biological sciences, associate professor of the department of Earth and Space Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0002-5388-6007, AuthorID 132664. *E-mail: A.A.Betekhtina@urfu.ru*

Alina V. Malakheeva, postgraduate of the department of Earth and Space Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0009-0002-0056-1054, AuthorID 1195211. *E-mail: alina.malakheeva@gmail.com*

Galina G. Borisova, doctor of geographical sciences, professor of department of experimental biology and biotechnologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0001-6663-9948, AuthorID 64374. *E-mail: G.G.Borisova@urfu.ru*

Olga V. Voropaeva, assistant at the department of experimental biology and biotechnologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0002-5055-797X, AuthorID 1124917. *E-mail: olga.voropaeva@urfu.ru*

Mariya G. Maleva, candidate of biological sciences, associate professor of department of experimental biology and biotechnologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0003-1686-6071, AuthorID 152548. *E-mail: maria.maleva@mail.ru*