

ВЛИЯНИЕ АНТИОКСИДАНТА СЕЛЕНА НА СОДЕРЖАНИЕ АУКСИНОВ И КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА ДЫХАНИЯ РАСТЕНИЙ СОИ В УСЛОВИЯХ ЗАСУХИ

Т.И. ПУЗИНА, доктор биологических наук, ORCID ID: 0000-0002-3418-4720,

E-mail: tipuzina@gmail.com

У.В. ЛЕГЧЕНКО, E-mail: ulegchenko@mail.ru

И.Ю. МАКЕЕВА*, кандидат биологических наук, ORCID ID: 0000-0001-9879-9938,

E-mail: makeevainna@inbox.ru

ФГБОУ ВО «ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.С. ТУРГЕНЕВА»

* ФГБОУ ВО «ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ», ЧЕЛЯБИНСК

Аннотация. Исследовали влияние антиоксиданта селена на содержание фитогормонов ауксинов, интенсивность дыхания и его качество, ростовые реакции в зависимости от водоснабжения 30-дневных растений сои сорта Зуша, выращенных в лабораторных условиях. Содержание ауксинов определяли методом биотестирования. Об интенсивности дыхания судили по количеству выделенного CO₂ в сосудах для газообмена. Первоначальные пути дыхательного обмена определяли методом ингибиторного анализа с использованием ингибитора гликолиза NaF. Функциональные составляющие дыхания определяли по разности дыхания на свету и в темноте. Выявлено значительное (в 1.7 раза) увеличение содержания ауксинов под действием селенита натрия (5.8·10⁻³ мМ) в оптимальных условиях водоснабжения и их уменьшение в условиях 5-дневной засухи. Селенит повысил интенсивность процесса дыхания, вне зависимости от водоснабжения растений, сместил начальные пути дыхательного обмена в сторону апоптоми, тогда как в контроле преобладал гликолитический путь. Показано некоторое увеличение траты энергии дыхания на дыхание поддержания под влиянием селена как в оптимальных условиях, так и при стрессе. Установлено, что антиоксидант селен был более эффективным в действии на ростовую активность стебля и объём корневой системы в условиях засухи. Полученные результаты обсуждаются в связи с действием селена на содержание ауксинов.

Ключевые слова: антиоксидант селен, ауксины, качество дыхания, ростовые реакции, засуха, соя.

Для цитирования: Пузина Т.И., Легченко У.В., Макеева И.Ю. Влияние антиоксиданта селена на содержание ауксинов и качественные показатели процесса дыхания растений сои в условиях засухи. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2026. № 1 (57):64-70 DOI: 10.24412/2309-348X-2026-1-64-70

EFFECT OF THE SELENIUM ANTIOXIDANT ON AUXIN CONTENT AND QUALITATIVE INDICATORS OF THE RESPIRATION PROCESS IN SOYBEAN PLANTS UNDER DROUGHT CONDITIONS

T.I. Puzina, U.V. Legchenko, I.Yu. Makeeva*

FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
«I. S. TURGENEV OREL STATE UNIVERSITY»

*FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER
EDUCATION «SOUTH URAL STATE MEDICAL UNIVERSITY» OF THE MINISTRY OF
HEALTH OF THE RUSSIAN FEDERATION, Chelyabinsk

Abstract: *The effect of the selenium antioxidant on the content of the phytohormone auxins, respiration intensity and quality, and growth responses was studied in 30-day-old plants of the Zusha soybean variety grown under laboratory conditions, depending on water supply. Auxin content was determined by the bioassay method. Respiration intensity was assessed by the amount of CO₂ released in gas exchange vessels. Initial respiratory exchange pathways were determined using inhibitor analysis methods with the glycolysis inhibitor NaF. Functional components of respiration were determined by the difference in respiration in light and darkness. A significant (1.7-fold) increase in auxin content under the action of sodium selenite (5.8·10⁻³ mM) was revealed under optimal water supply conditions, and a decrease in their content under 5-day drought conditions. Selenite increased the intensity of the respiration process regardless of plant water supply, shifted the initial respiratory exchange pathways toward the alternative pathway (apoptome), whereas in the control, the glycolytic pathway predominated. Some increase in energy expenditure on maintenance respiration under the influence of selenium was shown both under optimal conditions and under stress. It was established that the selenium antioxidant was more effective in affecting stem growth activity and root system volume under drought conditions. The obtained results are discussed in connection with the effect of selenium on auxin content.*

Keywords: selenium antioxidant, auxins, respiration quality, growth responses, drought, soybean.

Введение

Одним из актуальных направлений современной физиологии растений является изучение физиолого-биохимической роли антиоксидантов в растительном организме как в оптимальных, так и в стрессовых условиях среды [1, 2]. Микроэлемент селен является важнейшим низкомолекулярным компонентом антиоксидантной защиты живых организмов. Селен относится к редко встречающимся в земной коре элементам, поэтому большинство почв содержит низкое количество данного микроэлемента (Т. Ylärinta (1993).

Имеющиеся в литературе сведения в основном посвящены действию солей селена на работу антиоксидантной системы, ростовые реакции и продуктивность растений [3, 4]. Отсутствуют данные о влиянии селена на качественные показатели процесса дыхания, а также о физиологическом механизме его действия на данный процесс в оптимальных и стрессовых условиях среды.

Растения сои на начальном этапе онтогенеза весьма чувствительны к засухе.

Цель работы – выявление действия антиоксиданта селена на содержание фитогормонов ауксинов, пути дыхательного обмена и его функциональные составляющие у растений сои в условиях засухи.

Материал и методы исследования

Объектом исследования служили 30-дневные растения сои сорта Зуша (*Glycine max* (L.) Merr.) селекции ФГБНУ ФНЦ зернобобовых и крупяных культур.

Растения выращивали в кюветах с почвой «Универсальная для рассады» в условиях лаборатории Механизмы регуляции роста и развития растений Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева при температуре 20-22°C на 10-часовом фотопериоде. Варианты опыта включали: замачивание семян сои на шесть часов в 5.8·10⁻³ mM растворе селенита натрия. Контрольные семена замачивали в дистиллированной воде. Почвенную засуху создавали путем прекращения полива 30-дневных растений в течение 5 суток (влажность почвы составляла 30% от полной влагоёмкости). В оптимальных условиях водоснабжения растений поддерживали влажность 60% от полной влагоёмкости.

Содержание эндогенных ауксинов определяли методом биотестирования с последующим построением калибровочной кривой по индолилуксусной кислоте (ИУК). В качестве биотеста использовали зону растяжения coleoptилей пшеницы сорта Московская 39.

Интенсивность дыхания определяли по методике Т. К. Головки (1999), методом титрования по количеству выделяющегося CO₂ в сосудах для газообмена («Физприбор», Россия). Первоначальные пути дыхательного обмена определяли методом ингибиторного анализа, используя ингибитор гликолиза фторид натрия в концентрации 3·10⁻² М, который

Научно – производственный журнал «Зернобобовые и крупяные культуры» № 1 (57) 2026 г. вводили в побеги путем вакуумной инфильтрации. В контрольные побеги вводили дистиллированную воду.

Функциональные составляющие – дыхание поддержания (Rm) и дыхание роста (Rg) определяли по методике О.М. Семихатовой (1995). О дыхании поддержания судили по выделению CO₂ после пребывания растений в течение 48 часов в темноте. Дыхание роста рассчитывали по разнице между дыханием на свету и в темноте.

Физиологические показатели 30-дневных растений исследовали в листьях второго и третьего ярусов. Ростовую активность высоты стебля рассчитывали по формуле: $R_{\text{акт}} = (a_2 - a_1) / (a_1 \cdot t) \cdot 100$, где a_1 – величина ростового показателя при первом измерении, a_2 – при втором измерении, t – время в сутках. Объем корневой системы определяли методом Сабинина и Колосова по объему выделенной воды (Н.Н. Третьяков, 1990). На рисунках представлены средние арифметические из пяти биологических повторностей и их стандартные ошибки. Аналитическая повторность – пятикратная. Достоверность результатов оценивали с помощью критерия Стьюдента, считая достоверными различия при уровне доверительной вероятности выше 0.95 (Г.Ф. Лакин, 1980).

Результаты и их обсуждение

Известно, что в регуляции физиолого-биохимических процессов важнейшее значение придается фитогормонам. Однако, данные по влиянию микроэлементов на их содержание и соотношение немногочисленны и противоречивы. Прежде всего это касается микроэлемента селена. Лишь в единичных исследованиях имеются сведения о его действии на содержание отдельных групп фитогормонов, например, в растениях картофеля, конопли [5, 3]. В литературе не найдены данные по влиянию селена на содержание фитогормонов в растениях сои.

В результате исследования выявлено увеличение в 1.7 раза содержания ауксинов в листьях сои в варианте с селенитом при оптимальном водоснабжении (рис. 1 а). В работе Т.И. Пузиной, проведенной на растениях картофеля, также было показано возрастание (на 78%) количества индолилуксусной кислоты в результате обогащения посадочных клубней селеном [5]. Положительное действие селена на содержание ИУК, по данным S.C. Kwid (1989), может быть связано с ингибированием фермента ИУК-оксидазы.

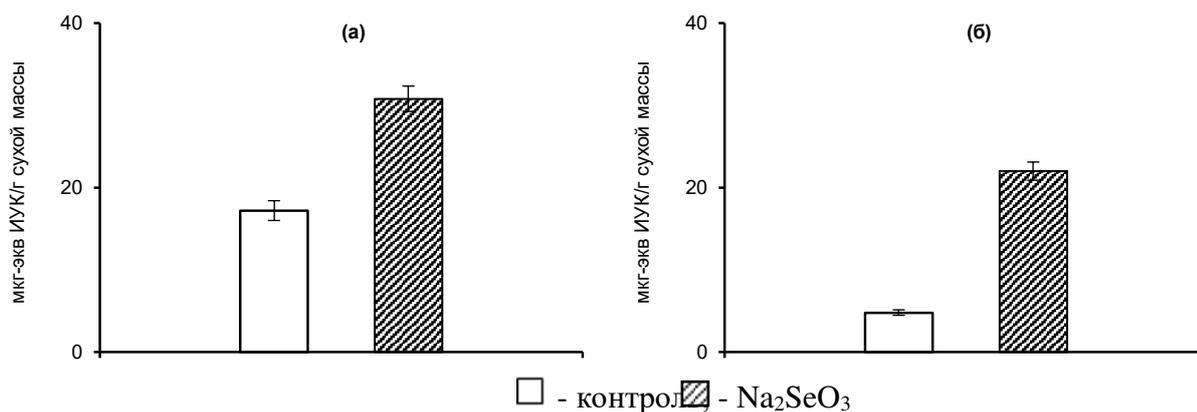


Рис. 1. Влияние селенита натрия на содержание ауксинов в листьях 30-дневных растений сои:

а. – оптимальное водоснабжение, б. – 5-дневная засуха.

Пятидневная засуха вызвала уменьшение количества фитогормонов ауксинов (рис. 1б), причем в большей степени в контрольном варианте – в 3.5 раза против 1.4 у растений, обработанных селенитом. Таким образом, селен был более эффективен в действии на содержание ауксинов в стрессовых условиях. В исследованиях Т.И. Пузиной, М.А. Цукановой также показано, что 10-дневная почвенная засуха почти в восемь раз снизила

Дыхание – важное звено в энергетическом обмене растительного организма. Одновременно его интермедиаты используются в различных метаболических реакциях. Поэтому представляет интерес изучение влияния антиоксиданта селена на качественные показатели процесса дыхания в оптимальных и стрессовых условиях среды. Проведенное исследование показало, что на фоне увеличения содержания фитогормонов ауксинов в варианте с селеном интенсифицировался процесс дыхания на 74% в условиях оптимального водоснабжения 30-дневных проростков сои (рис. 2 а). Как известно, ауксины активизируют дыхательные ферменты. 5-дневная засуха, несмотря на снижение ауксинов, существенно (в 1.8 раза) увеличила интенсивность дыхания контрольных побегов, что является неспецифической реакцией на стресс (рис. 2 б). В этих условиях селенит сдерживал повышение интенсивности дыхания. Снижение составило 27% против контроля.

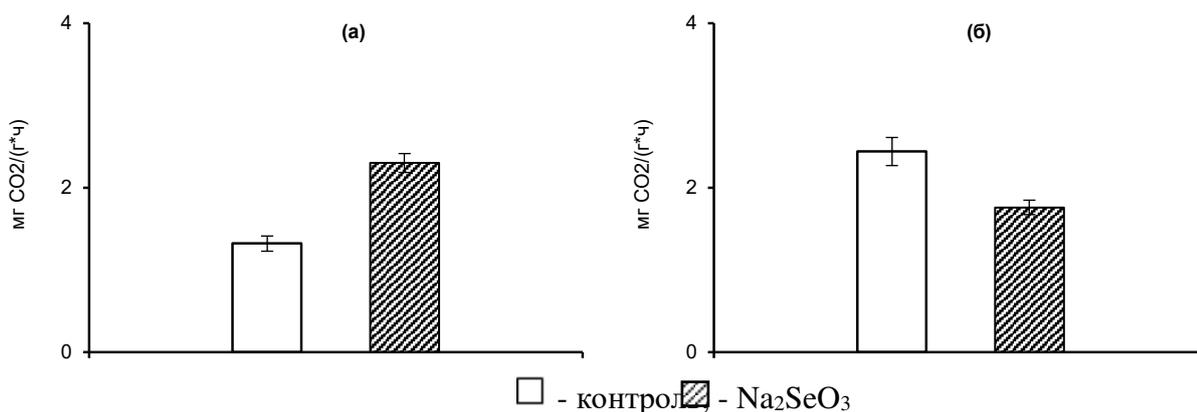


Рис. 2. Влияние селенита натрия на интенсивность дыхания листьев сои:
а. – оптимальное водоснабжение, б. – 5-дневная засуха.

Для характеристики процесса дыхания важно знать не только его интенсивность, но и качественные характеристики. Прежде всего – это начальные пути дыхательного обмена. Известно, что ингибитором гликолиза является фторид натрия, который при ингибировании дыхания на 50% и более указывает на преобладание гликолитического пути [7]. Из рис. 3 следует, что вне зависимости от водоснабжения проростков сои в контроле преобладал гликолитический путь, тогда как в варианте с селеном – апотомический (пентозофосфатный). На это указывает то, что процент ингибирования дыхания у растений, обогащенных селеном, составил менее 40%, тогда как в контроле – более 70%.

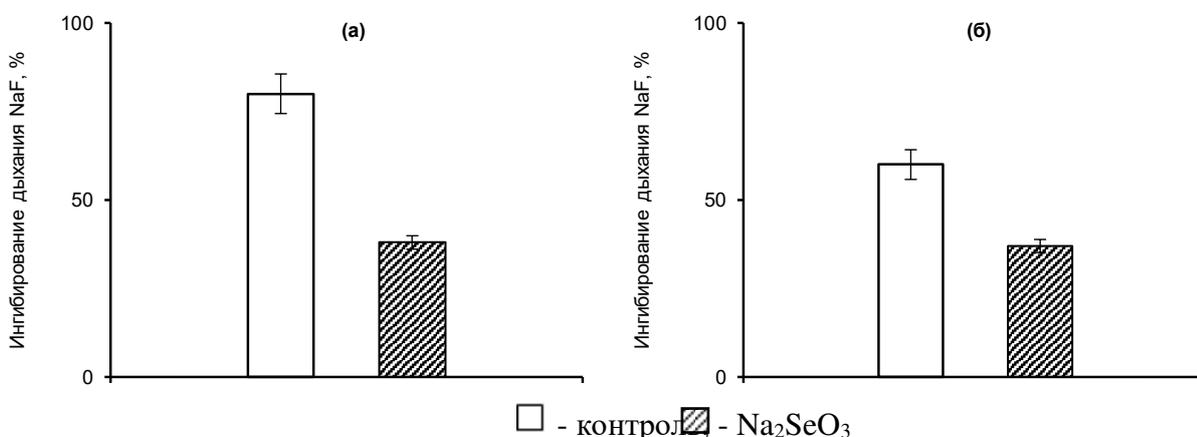


Рис. 3. Влияние селенита натрия на пути дыхательного обмена побегов сои:
а. – оптимальное водоснабжение, б. – 5-дневная засуха

Процесс дыхания состоит из двух функциональных составляющих: дыхания роста, обеспечивающего энергией процессы новообразования, и дыхания поддержания, которое снабжает энергией структурную организацию и обновление веществ уже существующей биомассы растений (О.А.Семихатова, 1995; Н.Н.Головкин, 1999). Полученные результаты свидетельствуют, что доля дыхания поддержания и дыхания роста у листьев сои в оптимальных условиях водоснабжения в контрольном варианте (рис. 4 а, б) была одинаковой и составляла 50%. Селенит несколько увеличил (на 15%) дыхание поддержания на фоне повышения содержания ауксинов (рис. 1 а), но снизил трату энергии на дыхание роста. Пятидневная засуха на 11% уменьшила R_m в контроле (рис. 4 в), однако в этих условиях антиоксидант сохранил стимулирующий эффект на дыхание поддержания. Дыхание роста (R_g) практически не отличалось от оптимальных условий водоснабжения как в контрольном варианте, так и обогащенном селеном (рис. 4 г).

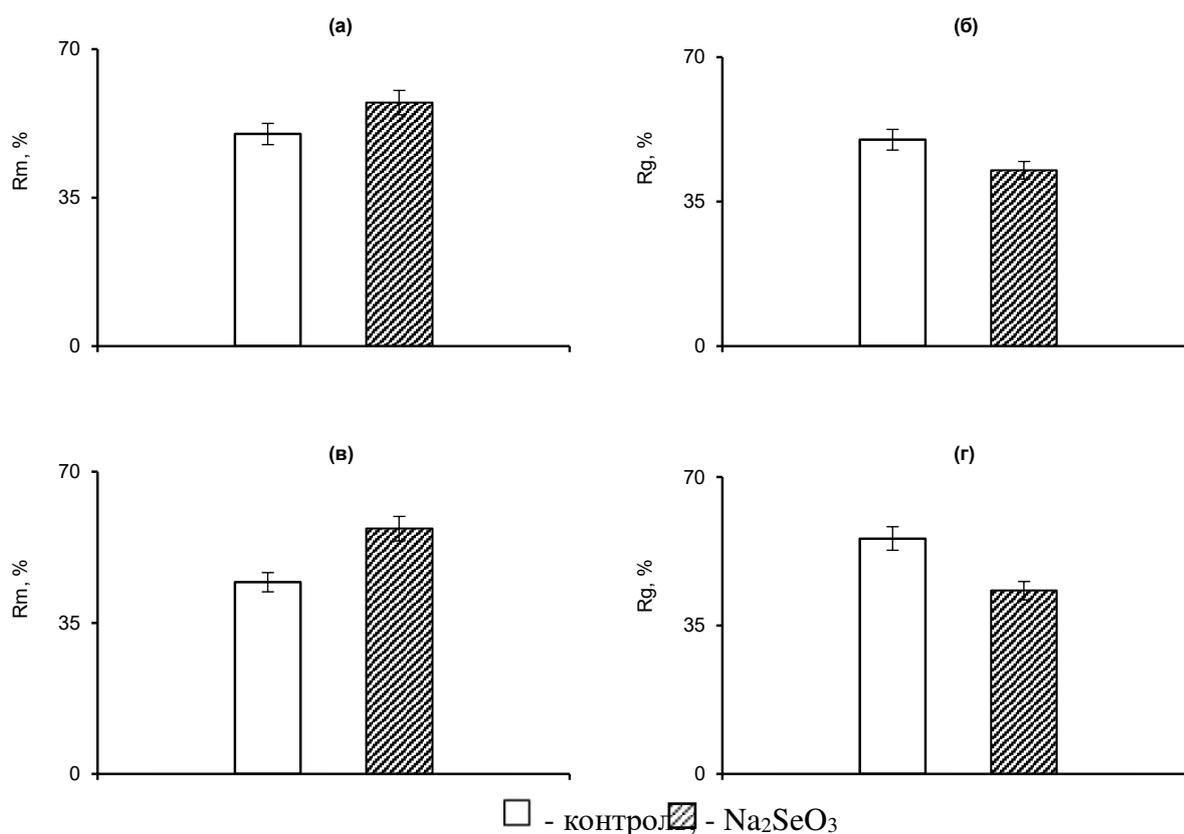


Рис. 4. Влияние селенита натрия на дыхание поддержания (R_m) и дыхание роста (R_g) побегов сои:

а. – оптимальное водоснабжение, б. – 5-дневная засуха

Рост является интегральным процессом в растительном организме. Данные литературы по влиянию селена на рост растений противоречивы. Это связано со способом обработки, применяемой концентрацией. Из рис. 5 следует, что кратковременная засуха в 1.7 раза снизила ростовую активность высоты стебля сои. В оптимальных условиях водоснабжения селен в 1.5 раза увеличил данный показатель. Большой стимулирующий эффект антиоксидант селен проявил в стрессовых условиях. Увеличение против контроля составило 2.6 раза.

Для бобовых растений большое значение имеет формирование корневой системы, так как на ней формируются клубеньки, в которых происходит процесс азотфиксации. Обогащение растений сои селеном повлияло не только на рост побега, но и на корневую систему (рис. 6), а именно увеличило количество боковых корней и объем корневой системы в 1.5 раза в оптимальных условиях (рис. 6 а, в).

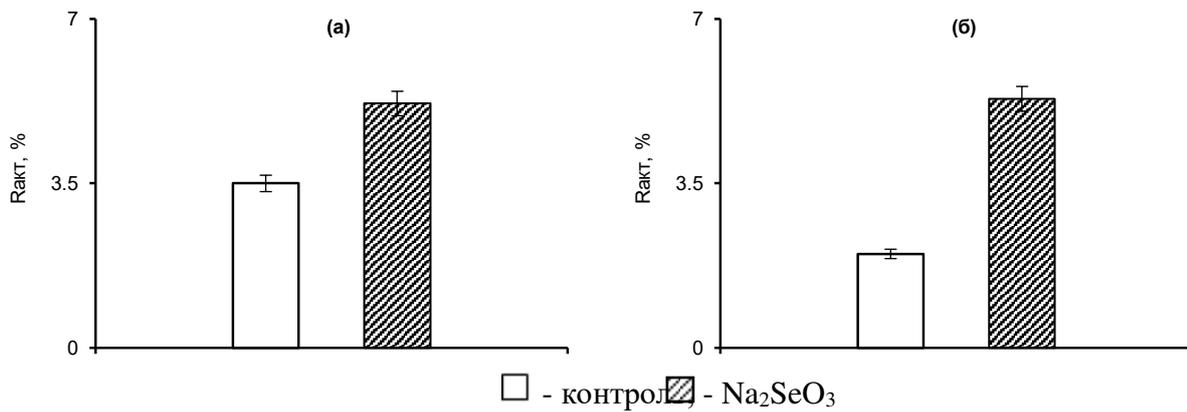


Рис. 5. Влияние селенита натрия на ростовую активность (Rakt) высоты стебля сои: а. – оптимальное водоснабжение, б. – 5-дневная засуха

Это происходило на фоне повышения содержания ауксинов, регулирующих процесс ризогенеза. В стрессовых условиях несколько уменьшилось количество боковых корней и объем корневой системы (рис. 6б, г). При этом, как и в случае с ростовой активностью стебля, селен был более эффективен в действии на объем корневой системы при засухе. Так, увеличение составило два раза против контроля, а в оптимальных условиях – 1.5 раза.

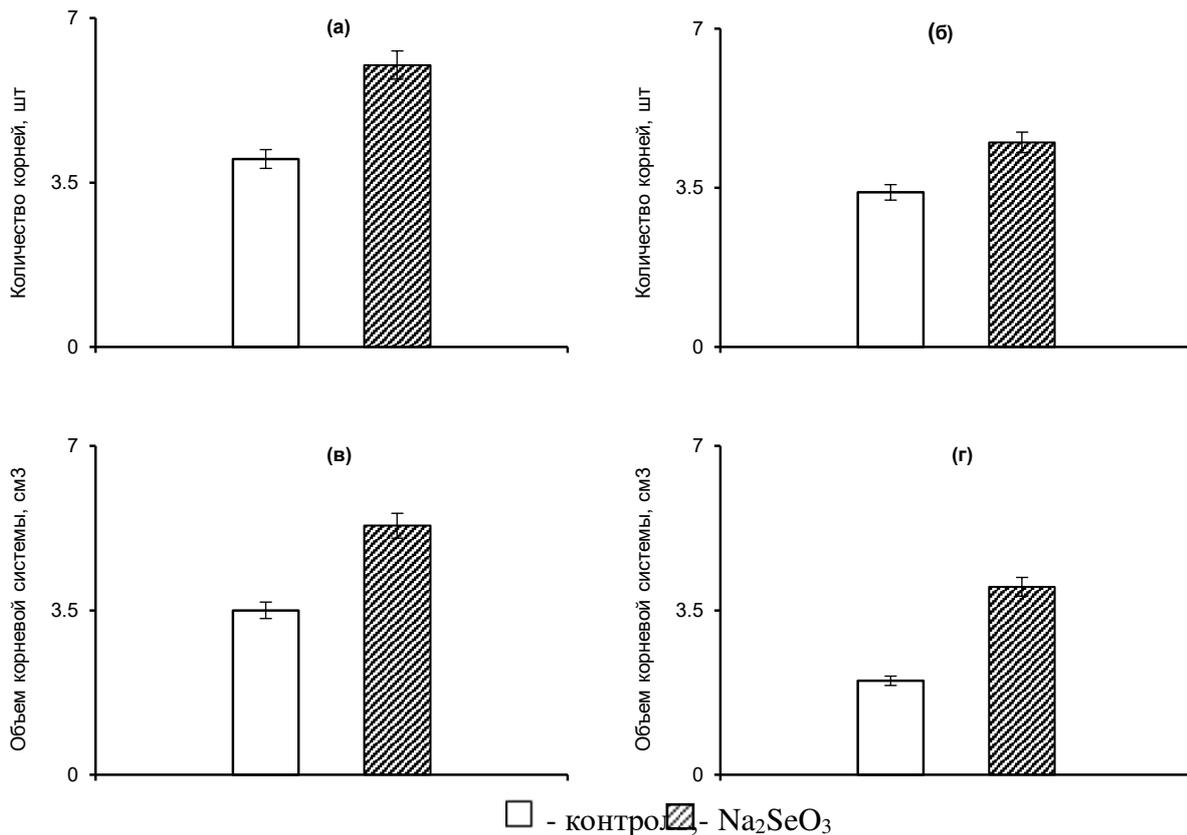


Рис. 6. Влияние селенита натрия на количество боковых корней и объем корневой системы сои. а, в. – оптимальное водоснабжение, б, г. – 5-дневная засуха:

Заключение

Таким образом, обогащение растений сои антиоксидантом селеном увеличивает содержание фитогормонов ауксинов при оптимальном водоснабжении и существенно сдерживает их снижение в условиях засухи. Выявлено повышение интенсивности дыхания в варианте с селенитом, смещение начальных путей дыхательного обмена в сторону апотомии, а также некоторое увеличение траты энергии на дыхание поддержания (Rm). В условиях засухи селен уменьшает стрессовое увеличение интенсивности дыхания, не изменяет начальные пути дыхательного обмена и сохраняет стимулирующий эффект на дыхание поддержания. Обогащение растений селеном увеличивает ростовую активность высоты стебля и объем корневой системы. Большой положительный эффект обнаружен в стрессовых условиях.

Литература

1. Кузнецов В.В., Холодова В.П., Кузнецов В.В., Ягодин Б.А. Селен регулирует водный статус растений при засухе. // Доклады Академии наук. – 2003. – Т. 390. – №. 5. – С. 713-715.
2. Klein A., Keyster M., Ludidi N. Caffeic acid decreases salinity-induced root nodule superoxide radical accumulation and limits salinity-induced biomass reduction in soybean. // Acta physiologiae plantarum. – 2013. – Т. 35. – №. 10. – P. 3059-3066. DOI 10.1007/s11738-013-1339-1.
3. Солдатов С. А. Влияние селената натрия на рост, развитие и проявление пола у двудомных растений конопли (*Cannabis sativa* L.): Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: МСХА. 2005. 28 с.
4. Серегина И.И., Ниловская Н.Т. Продуктивность и устойчивость яровой пшеницы в условиях окислительного стресса при применении селена. // Агрехимия. – 2015. – №. 3. – С. 56-63.
5. Пузина Т.И., Прудников П.С., Якушкина Н.И. Влияние селена на гормональный баланс и фотосинтетическую деятельность растений картофеля. // Доклады РАСХН. – 2005. – №. 6. – С. 7-9.
6. Пузина Т.И., Цуканова М.А. Влияние почвенной засухи на гормональную и антиоксидантную систему *Solanum tuberosum* в зависимости от обработки селенитом. // Ученые записки Орловского государственного университета. Серия: естественные, технические и медицинские науки. – 2008. – №. 2. – С. 51-56.
7. Plaxton W. C., Podestá F. E. The functional organization and control of plant respiration. // Critical Reviews in Plant Sciences. – 2006. – V 25. – №. 2. – P. 159-198. DOI 10.1080/07352680600595876.

References

1. Kuznetsov V.V., Kholodova V.P., Kuznetsov V.V., Yagodin B.A. Selen reguliruet vodnyi status rastenii pri zasukhe. *Doklady Akademii nauk*. 2003, Vol. 390, no. 5, pp. 713-715. (In Russian)
2. Klein A., Keyster M., Ludidi N. Caffeic acid decreases salinity-induced root nodule superoxide radical accumulation and limits salinity-induced biomass reduction in soybean. *Acta physiologiae plantarum*, 2013, Vol. 35, no. 10, pp. 3059-3066. DOI 10.1007/s11738-013-1339-1.
3. Soldatov S.A. Vliyanie selenata natriya na rost, razvitie i proyavlenie pola u dvudomnykh rastenii konopli: (*Cannabis sativa* L.): Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk. Moscow: MSKHA. 2005, 28 p. (In Russian)
4. Seregina I.I., Nilovskaya N.T. Produktivnost' i ustoichivost' yarovoi pshenitsy v usloviyakh okislitel'nogo stressa pri primenenii selenena. *Agrokhimiya*, 2015, no. 3, pp. 56-63. (In Russian)
5. Puzina T.I., Prudnikov P.S., Yakushkina N.I. Vliyanie selenena na gormonal'nyi balans i fotosinteticheskuyu deyatel'nost' rastenii kartofelya. *Doklady RASKHN*, 2005, no. 6, pp. 7-9. (In Russian)
6. Puzina T.I., Tsukanova M.A. Vliyanie pochvennoi zasukhi na gormonal'nyuyu i antioksidantnyuyu sistemu *Solanum tuberosum* v zavisimosti ot obrabotki selenitom. *Uchenye zapiski Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta*. Seriya: estestvennye, tekhnicheskie i meditsinskie nauki, 2008, no. 2, pp. 51-56. (In Russian)
7. Plaxton W.C., Podestá F.E. The functional organization and control of plant respiration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2006, Vol. 25, no. 2, pp. 159-198. DOI 10.1080/07352680600595876.