

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГАЗООБМЕНА СЕЛЕКЦИОННЫХ ОБРАЗЦОВ ИССОПА НА ЮВЕНИЛЬНОМ ЭТАПЕ ОНТОГЕНЕЗА В УСЛОВИЯХ СОЛЕВОГО СТРЕССА*

В. И. Чернявских¹, доктор сельскохозяйственных наук
Е. В. Думачева¹, доктор биологических наук
У. К. Шейх²

¹ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса», г. Лобня Московской области, Россия,
cherniavskih@vniikormov.ru

²ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский
университет» г. Белгород, Россия

Изучены параметры газообмена на ювенильном этапе онтогенеза у особой селекционных образцов двух морфотипов иссопа лекарственного под действием стрессовых факторов (условий засоления и различной интенсивности фотосинтетически активной радиации). Исследование проводили с использованием системы LI-6800, LI-COR. Имитировали условия засоления: контроль — H₂O, опыт — 0,05M NaCl. На ювенильном этапе онтогенеза установлены существенные отличия параметров интенсивности ассимиляции CO₂ и транспирации у селекционных образцов различных морфотипов по устойчивости к абиотическим стрессовым факторам. Изученные селекционные образцы, как синецветкового, так и белоцветкового морфотипов, показали достаточно высокую степень устойчивости к засолению и будут использованы в качестве источников ценных селекционных признаков в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: фотосинтетически активная радиация, хлоридное засоление, фотосинтез, транспирация, темновое дыхание, белоцветковый морфотип иссопа лекарственного (*H. officinalis f. albus*), синецветковый морфотип иссопа лекарственного (*H. officinalis f. cyaneus*).

Введение. Изучение новых доноров и источников для селекции широкого спектра сельскохозяйственных культур требует новых путей оценки потенциальной адаптивной способности новых селекционных форм приспособляться к антропогенным нагрузкам, а также комплексу био- и абиотических факторов [1–3]. Одним из наиболее перспективных способов оценки устойчивости новых селекционных номеров является оценка процессов фотосинтеза и водообмена на ювенильном этапе

*Работа выполнена при поддержке проекта N 075-15-2021-541 (внутренний номер 09.ССЦ.21.0008) по теме: Реализация направлений, соответствующих программе создания и развития «Центра по кормовым культурам для создания и внедрения в агропромышленный комплекс современных технологий на основе собственных разработок Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса» (ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»).

онтогенеза. Этим путем в настоящее время идет поиск новых устойчивых форм, используемых в исследованиях по «спид-бридингу», у многих видов бобовых и злаковых трав: люцерны, клевера, овсяниц и других [4].

Иссоп лекарственный (*Hyssopus officinalis* L.) — многолетнее травянистое растение из семейства Яснотковые (Lamiaceae). Культивируется повсеместно как овощное, пряно-вкусовое, медоносное, лекарственное и декоративное растение [5; 6]. Рекомендуются к использованию в качестве фитобиотика и кормовой добавки при кормлении птицы [7].

Исследования, проведенные в Центральном Черноземье, показывают важность процессов индивидуального и семейного отбора, а также экологического сортоиспытания для получения новых селекционных форм иссопа лекарственного, имеющих морфологические и биохимические различия [8–12].

Изучение пределов варьирования физиологических признаков у селекционных образцов иссопа лекарственного при адаптации к комплексу абиотических факторов имеет большое значение для создания новых сортов. Физиологическая оценка адаптивных способностей нового селекционного материала позволяет вовлекать его в процессы генетического улучшения и создания новых сортов иссопа [13–16].

Цель работы: изучить параметры газообмена у ювенильных особей белоцветкового (*H. officinalis* f. *albus*) и синецветкового (*H. officinalis* f. *cyaneus*) морфотипов иссопа под действием солевого стресса на фоне различной интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР).

Материалы и методы исследований. Исследования проводились в 2023–2024 гг. на семядольных листьях селекционных образцов иссопа лекарственного с использованием системы LI-6800, LI-COR на базе лаборатории физиологии сельскохозяйственных растений ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса».

В опыте исследовали два новых селекционных образца синецветкового морфотипа (*H. officinalis* f. *cyaneus*) и белоцветкового морфотипа (*H. officinalis* f. *albus*), которые выделились по селекционно ценным признакам и свойствам в полевых исследованиях, проведенных в Белгородской области в 2022–2023 гг. Семена проращивали стандартным методом: после стерилизации 96%-ным C_2H_5OH , в чашках Петри в климатической камере при температуре 24 °С. Повторность в опыте трехкратная. Имитировали условия засоления: контроль — H_2O , опыт — 0,05M NaCl и изменяли фактор освещенности — интенсивность ФАР: 0, 50, 150, 300, 600, 900, 1200, 1500 $\mu M/m^2c$ [17–18]. Результаты исследований статистически обработаны [19].

Результаты и их обсуждение. Ювенильный этап развития растений на этапе формирования семядольных листьев, по мнению исследователей, является определяющим (базовым) для последующего функционирования растительного организма на более поздних стадиях онтогенеза [20; 21].

Показателем функционирования метаболизма, направленного на рост и поддержание функционирования структур растительного организма, является темновое дыхание [22]. В опыте установлено, что интенсивность темнового дыхания у селекционных образцов различных морфотипов существенно отличалась: в условиях засоления синецветковые формы были более устойчивыми.

Установлены различия между состоянием семядольных листьев у контрольных вариантов и вариантов с хлоридным засолением. Темновое дыхание в контроле в среднем составило $3,55 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. В условиях хлоридного засоления интенсивность процесса снижалась на 74,6 %.

При уровне ФАР $50 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ интенсивность фотосинтеза между морфотипами существенно не отличалась и в контроле составила в среднем $1,48 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. В условиях засоления показатель у семядолей всех образцов снижался на 57,4 % до величины $0,63 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. При повышении интенсивности облучения до $150 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ ассимиляция возросла в контроле до $2,32 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. На фоне засоления фотосинтез был ниже на 35,8 % — $1,49 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$.

Дальнейшее увеличение ФАР до $300 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ интенсивность фотосинтеза у семядольных листьев иссопа синецветкового была выше белоцветкового на 14,6 %, при засолении — на 26,2 %. При этом в среднем интенсивность фотосинтеза повысилась у проростков в контрольном варианте до $3,78 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$, в опытном варианте — до $2,36 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. Интенсивность фотосинтеза у семядольных листьев в опытном варианте была ниже контрольного на 37,6 %.

При повышении интенсивности ФАР до $600 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ в среднем интенсивность фотосинтеза у семядолей в контроле возросла до $6,96 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. В условиях засоления фотосинтез также постепенно повышался, но оставался ниже контроля на 48,6 % и в среднем составил $3,58 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. У различных морфотипов семядольные листья реагировали на повышение интенсивности ФАР различным образом: интенсивность фотосинтеза у семядолей синецветковых форм в контроле превысила белоцветковые на 43,3 %, в условиях засоления существенной разницы между морфотипами не установлено.

При повышении интенсивности ФАР до $900 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ интенсивность ассимиляции у семядольных листьев обоих морфотипов в контрольном варианте в среднем возросла до $7,70 \mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ и существенной разницы не наблюдалось. Тенденция отставания скорости ассимиляции

в условиях засоления сохранилась: в опытном варианте фотосинтез был ниже на 32 % и составил 5,23 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$.

При интенсивности ФАР в диапазоне 900–1200 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ у семядольных листьев наступила фаза светового насыщения фотосинтеза, как в опытном, так и в контрольном вариантах. На фоне ФАР 1200 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ интенсивность фотосинтеза составила в контроле в среднем 6,68 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. Скорость ассимиляции в опытном варианте у семядолей отставала на 26,9 % и составила 4,88 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$.

При максимальной освещенности (1500 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$) интенсивность фотосинтеза в контроле в среднем составила 3,83 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. Тенденция отставания скорости ассимиляции в условиях засоления сохранилась: в опытном варианте показатель был ниже на 47 % и составил 2,03 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$.

Световые кривые фотосинтеза подчинялись полиномиальному распределению с достаточно высокими коэффициентами аппроксимации ($R^2 = 0,972\text{--}0,975$) (табл. 1).

1. Уравнения, описывающие световые кривые фотосинтеза у иссопа в зависимости от условий засоления

Вариант	Морфотип	Уравнение полиномиальной функции	R^2
Контроль	синецветковый	$0,0275x^5 - 0,6386x^4 + 5,4176x^3 - 20,829x^2 + 37,91x - 25,089$	0,9751
	белоцветковый	$-0,0514x^4 + 0,8877x^3 - 5,4935x^2 + 15,648x - 14,69$	0,9776
0,05M NaCl	синецветковый	$-0,0324x^4 + 0,4867x^3 - 2,4231x^2 + 5,5726x - 3,8791$	0,9719
	белоцветковый	$-0,0252x^4 + 0,3949x^3 - 2,1853x^2 + 6,0379x - 5,7482$	0,9874

Интенсивность транспирации во всех вариантах опыта между морфотипами также не различалась, и в контрольном варианте у семядольных листьев иссопа в среднем составила 1,55 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. В условиях засоления показатель снижался на 58 % — до уровня 0,65 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. При низком уровне ФАР 50 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ интенсивность транспирации у семядольных листьев в контроле в среднем составила 2,00 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. У семядолей в условиях засоления скорость водообмена возросла по сравнению с контролем на 6,5 % и составила 2,13 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$.

По мере повышения интенсивности освещенности до 150 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ интенсивность транспирации повысилась в контроле в среднем до 3,34 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. В условиях засоления скорость нарастания транспирации снизилась на 14,7 % и составила 2,85 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$.

Тенденция замедления скорости процесса по мере повышения освещенности сохранялась и на уровне ФАР 300 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$: транспирация в контроле составила 4,37 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$, в опытном варианте — 3,74 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$, что

было ниже контроля на 14,4 %. Однако при уровне ФАР 600 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ интенсивность транспирации у семядольных листьев в контроле существенно не изменилась и осталась на уровне 4,85 mM/m^2 . В то же время в опытном варианте показатель увеличился до 5,16 mM/m^2 . Аналогичная тенденция сохранилась и при уровне ФАР 900 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$: интенсивность транспирации составила в контроле в среднем 5,16 mM/m^2 , в опытном варианте — 5,73 mM/m^2 .

На фоне дальнейшего повышения интенсивности ФАР до 1200 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ интенсивность транспирации в контроле снизилась в 1,36 раза — до 3,79 mM/m^2 . При этом у семядольных листьев в условиях засоления показатель возрос до 6,30 mM/m^2 , что было выше контрольного варианта на 66,2 %. При максимальном уровне ФАР 1500 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$ интенсивность транспирации у семядольных листьев в контрольном варианте существенно не изменилась и осталась на уровне 3,67 mM/m^2 . В опытном варианте скорость водообмена также стала снижаться и составила 4,07 mM/m^2 .

Световые кривые транспирации подчинялись полиномиальному распределению с достаточно высокими коэффициентами аппроксимации ($R^2 = 0,954\text{--}0,973$) (табл. 2).

2. Уравнения, описывающие световые кривые транспирации у иссопа в зависимости от условий засоления

Вариант	Форма	Уравнение полиномиальной функции	R^2
Контроль	синецветковый	$0,0101x^5 - 0,2135x^4 + 1,6009x^3 - 5,2854x^2 + 8,5061x - 3,3675$	0,9539
	белоцветковый	$0,0211x^4 - 0,3932x^3 + 2,3158x^2 - 4,2308x + 4,0749$	0,9922
0,05 M NaCl	синецветковый	$-0,0304x^4 + 0,5063x^3 - 2,9145x^2 + 7,418x - 3,9376$	0,9981
	белоцветковый	$-0,0672x^3 + 0,7252x^2 - 1,0113x + 0,7741$	0,9726

Таким образом, на ювенильном этапе онтогенеза выявлено существенное влияние условий засоления и различной интенсивности ФАР на показатели газообмена у селекционных образцов иссопа. Селекционные образцы синецветкового морфотипа обладают более высокой устойчивостью параметров газообмена — темнового дыхания, фотосинтеза и транспирации по сравнению с белоцветковым морфотипом в диапазоне ФАР от 0 до 600 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{c}$. Изученные селекционные образцы, как синецветкового, так и белоцветкового морфотипа, показали достаточно высокую степень устойчивости к засолению и будут использованы в ка-

честве источников ценных селекционных признаков в дальнейших исследованиях.

Литература

1. Косолапов В. М., Чернявских В. И., Костенко С. И. Современное состояние и вызовы для отрасли кормопроизводства в России // Кормопроизводство. – 2022. – № 10. – С. 3–8.
2. Многолетние травы для пастбищ, газонов и рекультивации: селекция и практика / В. М. Косолапов, С. И. Костенко, Е. В. Думачева, В. И. Чернявских // Кормопроизводство. – 2022. – № 10. – С. 14–17.
3. Использование биоресурсного потенциала ботанического сада для разработки экскурсионных программ / Е. В. Думачева, В. И. Чернявских, А. А. Польшина, М. Е. Комарова // Научный результат. Серия: Технология бизнеса и сервиса. – 2014. – Т. 1, № 1(1). – С. 4–14.
4. Перспективы использования результатов изучения фотосинтеза в селекции растений: обзор основных направлений исследований / Е. В. Думачева, В. И. Чернявских, Л. Д. Сайфутдинова [и др.] // Кормопроизводство. – 2024. – № 4. – С. 18–29.
5. Пикалова Е. В. Морфометрия и семенная продуктивность некоторых представителей семейства Lamiaceae участка лекарственных растений Ботанического сада Оренбургского государственного университета // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. – 2022. – № 22(1). – С. 74–81.
6. Губанов В. Г., Губанова В. М. Биологические особенности иссопа лекарственного (*Hyssopus officinalis*) // Коняевские чтения: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 20 декабря 2019 года. – Екатеринбург : Уральский ГАУ, 2020. – С. 108–110.
7. Mobilization of Genetic Resources of *Hyssopus Officinalis* L. For Selection for Seed Productivity and Essential Oil Content / V. I. Cherniavskih, E. V. Dumacheva, V. I. Zejko [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2, Moscow, 17–20.06.2021. – Moscow, 2021. – P. 012055.
8. Чернявских В. И. Селекция и семеноводство иссопа лекарственного (*Hyssopus officinalis* L.) в Центрально-Черноземном регионе // Таврический вестник аграрной науки. – 2018. – № 3(15). – С. 137–146.
9. Чернявских В. И., Думачева Е. В. Генетическая коллекция многолетних бобовых трав Белгородской области: этапы формирования, пути мобилизации и селекционный потенциал // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 1. – С. 63–68.
10. Мобилизация биологических ресурсов дикорастущих форм *Hyssopus officinalis* L. для селекции / В. И. Чернявских, Е. В. Думачева, У. К. Шейх Д. [и др.] // Кормопроизводство. – 2023. – № 6. – С. 17–22.
11. Filatov S. V., Dumachev D. V. Cenopopulations of *Hyssopus officinalis* L. in the Belgorod region: Spatial Structure and Bioresource Potential // Полевой журнал биолога. – 2022. – Vol. 4, No. 1. – P. 80–90.
12. Думачева Е. В., Чернявских В. И. Патент на селекционное достижение № 11396. Иссоп лекарственный – *Hyssopus officinalis* Лазарь: № 79351: заявл. 17.10.2019.
13. Сачивко Т. В., Босак В. Н. Разработка методики оценки хозяйственно полезных признаков иссопа лекарственного // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2024. – № 3. – С. 96–103.

14. Mohammadi R., Roshandel P. Ameliorative effects of a static magnetic field on Hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) growth and phytochemical traits under water stress // Bioelectromagnetics. – 2020. – Vol. 41(6). – P. 403–412.
15. Antioxidant Defense and secondary metabolites concentration in hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) plants as affected by salt stress / Zh. Soheilikhah, N. Karimi, M. Modarresi [et al.] // Acta Agriculturae Slovenica. – 2021. – Vol. 117, № 2. – P. 1–12.
16. Drought stress response of hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) as influenced via the antitranspirants and osmolytes materials / Hosseini S. Khajeh, F. Fanoodi, S. A. Tabatabaei [et al.] // Italian Journal of Agrometeorology. – 2021. – № 2. – P. 35–44.
17. Evans J. R., Santiago L. S. Prometheus Wiki gold leaf protocol: gas exchange using LI-COR 6400 // Funktsional'naya biologiya rasteniy. – 2014. – Vol. 41(3). – P. 223–226.
18. Riches M., Lee D., Farmer D. K. Simultaneous leaf-level measurement of trace gas emissions and photosynthesis with a portable photosynthesis system // Atmos. Meas. Tech. – 2020. – Vol. 13. – P. 4123–4139. – DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-13-4123-2020>.
19. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. – М. : Книга по Требованию, 2012. – 352 с.
20. Рахманкулова З. Ф., Усманов И. Ю. Морфофизиологические параметры проростков пшеницы устойчивых и высокопродуктивных сортов в норме и при стрессе // Физиология растений. – 2000. – Т. 47, № 4. – С. 608–613.
21. Рахманкулова З. Ф. Физиологические аспекты взаимосвязи фотосинтеза и дыхания // Физиология растений. – 2019. – Т. 66, № 3. – С. 178–188.
22. Рахманкулова З. Ф. Дыхание растений и глобальные изменения климата // Физиология растений. – 2022. – Т. 69, № 6. – С. 572–588.

ASSESSMENT OF GAS EXCHANGE PARAMETERS OF HYSSOP SELECTION SAMPLES AT THE JUVENILE STAGE OF ONTOGENESIS UNDER SALT STRESS

V. I. Chernyavskikh, E. V. Dumacheva, U. K. Sheikh

*The parameters of gas exchange at the juvenile stage of ontogenesis in individuals of selection samples of two morphotypes of hyssop under the influence of stress factors (salinity conditions and different light intensities) were studied. The study was conducted on cotyledon leaves of selection samples of white-flowered hyssop (*Hyssopus officinalis* f. *albus*) and blue-flowered hyssop (*H. officinalis* f. *cyaneus*) using the LI-6800, LI-COR system. Salinity conditions were simulated: control — water (H₂O), experiment (0.05M NaCl). At the juvenile stage of ontogenesis, significant differences in the parameters of CO₂ assimilation and transpiration intensity were established in breeding specimens of different morphotypes in terms of resistance to abiotic stress factors. The studied breeding specimens of both blue-flowered and white-flowered morphotypes showed a sufficiently high degree of resistance to salinity and will be used as sources of valuable breeding traits in further studies.*

Keywords: *photosynthetically active radiation, chloride salinity, photosynthesis; transpiration, dark respiration, white-flowered morphotype of medicinal hyssop (*H. officinalis* f. *albus*), blue-flowered morphotype of medicinal hyssop (*H. officinalis* f. *cyaneus*).*