

**СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ/PLANT BREEDING, SEED PRODUCTION AND BIOTECHNOLOGY**DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.17> EDN: GWWBMC**ИНДУКЦИЯ СОЛЕУСТОЙЧИВОСТИ И СТИМУЛЯЦИЯ РОСТА *TRITICUM AESTIVUM* L. ГАЛОТОЛЕРАНТНЫМИ ЭНДОФИТНЫМИ БАКТЕРИЯМИ**

Научная статья

Тугбаева А.С.^{1,*}, Дарказанли М.², Ширяев Г.И.³, Малева М.Г.⁴¹ ORCID : 0000-0001-9231-3650;² ORCID : 0000-0002-4254-6410;³ ORCID : 0000-0002-1210-4283;⁴ ORCID : 0000-0003-1686-6071;^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (anastasia.tugbaeva[at]urfu.ru)

Предложена: 30.04.2026; Принята: 10.06.2026; Опубликована: 19.06.2026

Аннотация

Представлены результаты исследования, направленного на оценку влияния галотолерантного штамма эндофитных бактерий PS-51, изолированных из эндосферы корня *Plantago salsa* Pall., на рост и устойчивость растений *Triticum aestivum* L. (пшеницы мягкой яровой, сорта Ирень 2) к умеренному натрий-хлоридному засолению. Семена пшеницы поверхностно стерилизовали и инокулировали суспензией бактерий (10^8 КОЕ/мл). В качестве контроля использовали неинокулированные растения. Растения выращивали на торфяном субстрате без/с добавлением 75 мМ NaCl в течение 56 дней. Инокуляция штаммом PS-51 в условиях засоления увеличивала высоту побега (в среднем на 12%), площадь поверхности и сухую массу флагового листа 56-дневных растений (на 12 и 17%, соответственно), содержание хлорофиллов и каротиноидов (в среднем на 15 и 12% соответственно), количество пролина и водорастворимых сахаров (на 19 и 16%, соответственно). Тем самым штамм PS-51 представляет интерес как потенциальная основа для создания эффективных бактериальных препаратов, повышающих устойчивость и стимулирующих рост культурных растений в условиях NaCl-засоления.

Ключевые слова: пшеница мягкая, солевой стресс, фотосинтетические пигменты, пролин, водорастворимые сахара.

INDUCTION OF SALT TOLERANCE AND GROWTH STIMULATION IN *TRITICUM AESTIVUM* L. BY HALOTOLERANT ENDOPHYTIC BACTERIA

Research article

Tugbaeva A.S.^{1,*}, Darkazanli M.², Shiryaev G.I.³, Maleva M.G.⁴¹ ORCID : 0000-0001-9231-3650;² ORCID : 0000-0002-4254-6410;³ ORCID : 0000-0002-1210-4283;⁴ ORCID : 0000-0003-1686-6071;^{1,2,3,4} Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (anastasia.tugbaeva[at]urfu.ru)

Suggested: 30.04.2026; Accepted: 10.06.2026; Published: 19.06.2026

Abstract

The results of a study aimed at assessing the effect of the halotolerant strain of endophytic bacteria PS-51, isolated from the root endosphere of *Plantago salsa* Pall., on the growth and tolerance of *Triticum aestivum* L. (spring soft wheat, "Iren 2" variety) to moderate sodium chloride salinity are presented. Wheat seeds were surface-sterilised and inoculated with a bacterial suspension (10^8 CFU/ml). Uninoculated plants were used as a control group. The plants were grown on a peat substrate with or without the addition of 75 mM NaCl for 56 days. Inoculation with strain PS-51 under salinity conditions increased shoot height (by 12% on average), the surface area and dry weight of the flag leaf of 56-day-old plants (by 12 and 17%, respectively), the content of chlorophylls and carotenoids (by an average of 15 and 12%, respectively), and the levels of proline and water-soluble sugars (by 19 and 16%, respectively). The PS-51 strain is therefore of interest as a potential basis for the development of effective bacterial drugs that enhance the resistance of and stimulate the growth of cultivated plants under conditions of NaCl salinity.

Keywords: soft wheat, salt stress, photosynthetic pigments, proline, water-soluble sugars.

Введение

Пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.) является одной из важнейших продовольственных культур в мире, которая содержит относительно высокое содержание белка в зерне среди злаковых культур и обеспечивает значительную долю калорий в рационе человека [1]. Занимая первое место в мире по площади культивирования [2], ее урожайность

зависит от многих стрессовых факторов, в том числе засоления. Засоление почв, усиливающееся вследствие нарушения технологий ирригации, климатических изменений и антропогенной нагрузки [3], существенно ограничивает рост и развитие культурных растений, приводя к снижению урожайности и ухудшению пищевой ценности зерна [4].

Солевой стресс вызывает у растений комплекс физиолого-биохимических нарушений, включая осмотический стресс, ионный дисбаланс и накопление активных форм кислорода [5]. Одним из наиболее чувствительных и информативных показателей воздействия стресса является рост растений, поскольку он интегрирует влияние неблагоприятных факторов на клеточное деление, растяжение и метаболическую активность. Показатели роста, такие как длина побегов и корней, биомасса и скорость развития, широко используются как маркеры стрессового состояния и напрямую связаны с конечной продуктивностью культуры [4], [6].

В последние годы всё большее внимание уделяется биологическим подходам к повышению устойчивости растений к абиотическим стрессам. Особый интерес представляют галотолерантные эндофитные бактерии, стимулирующие рост растений (от англ. «Plant Growth Promoting Endophytic Bacteria», PGPEB), которые способны колонизировать внутренние ткани растений без причинения вреда и оказывать положительное влияние на их развитие [7], [8]. Эти микроорганизмы способствуют улучшению минерального питания, синтезируют фитогормоны, регулируют уровень стрессовых метаболитов и повышают антиоксидантную активность растений [7], [8].

В связи с этим использование галотолерантных эндофитных бактерий рассматривается как перспективная стратегия повышения солеустойчивости *T. aestivum* и стабилизации его роста в условиях засоления. Изучение их влияния на ростовые параметры пшеницы позволяет не только оценить степень стрессоустойчивости растений, но и выявить потенциальные механизмы повышения их продуктивности в неблагоприятных условиях среды.

Цель исследования — оценка эффективности использования солеустойчивого штамма эндофитных PGP бактерий PS-51 для улучшения роста и повышения устойчивости *T. aestivum* к умеренному хлоридному засолению корнеобитаемой среды.

Методы и принципы исследования

В работе исследовали солеустойчивый ИУК-продуцирующий штамм PGPEB PS-51, изолированный из эндосферы корня *Plantago salsa* Pall. Штамм, используемый для инокуляции семян, предварительно культивировали в жидкой среде Лурия-Бертани (LB), содержащей 5% NaCl, в течение 48 часов при 27 °C и постоянным перемешиванием при 160 об/мин. Бактериальные клетки отделяли от культуральной жидкости центрифугированием (5000 об/мин, 10 мин), трижды промывали стерильным физиологическим раствором и ресуспендировали в стерильном физиологическом растворе (0,9% NaCl). Концентрация клеточной суспензии составляла $\sim 10^8$ КОЕ/мл.

Семена *T. aestivum* (пшеницы мягкой яровой, сорт Ирень 2), используемые для эксперимента, были предоставлены Уральским НИИСХ-филиалом ФГБНУ УрФАНИЦ УрОРАН (г. Екатеринбург). Семена поверхностно стерилизовали [9] и инокулировали бактериальной суспензией в течение 1 часа. В качестве контроля служили неинокулированные семена (НС), замоченные на 1 час в стерильной дистиллированной воде. Солевой стресс создавали путем дополнительной предобработки не- и инокулированных семян стерильным раствором 75 mM NaCl в течение 1 часа перед посадкой. Далее семена четырех вариантов обработки переносили в вегетационные сосуды объемом 0,5 л (по 5 семян/сосуд, 6 сосудов/вариант). В качестве субстрата использовали нейтрализованный торф (pH 7.0, содержание общего N, P, K — не менее 350 мг/л субстрата). Вегетационный опыт включал 4 варианта:

- 1 — контроль (НС);
- 2 — семена, инокулированные штаммом PGPEB (PS-51);
- 3 — НС с внесением раствора 75 mM NaCl;
- 4 — PS-51 + 75 mM NaCl.

Растения культивировали в течение 56 дней в контролируемых условиях при освещенности 180 ± 20 мкмоль/м² с, фотопериоде — 16:8 часов (день:ночь) и температуре — 23 ± 2 °C. Полив растений проводили отстоянной водой по мере подсыхания субстрата. В конце эксперимента измеряли высоту побега, длину и ширину флагового листа, его сырую и сухую массу. Площадь листьев рассчитывали согласно Kumar et al. [10].

Содержание хлорофиллов *a*, *b* (Хл *a*, Хл *b*) и каротиноидов определяли спектрофотометрически (UV-1800, Shimadzu Corp., Япония) при 440, 649 и 665 нм после экстрагирования навески свежих листьев в 96% этиловый спирт [11]. Количество пролина определяли спектрофотометрически нингидриновым методом [12], содержание растворимых сахаров спектрофотометрически — с антроновым реактивом [13].

Статистический анализ проводили с использованием Statistica 10, визуализировали в Excel 16.0. Значимость различий между вариантами оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (one-way ANOVA) с последующим применением критерия Тьюки (Tukey's HSD test). На рисунках представлены средние арифметические значения и их стандартные ошибки ($n = 6$), разными латинскими буквами обозначены достоверные различия между вариантами при $p < 0,05$.

Основные результаты и обсуждение

Влияние солевого стресса на морфофизиологические показатели растений является одним из ключевых индикаторов их адаптационного потенциала, поскольку ростовые параметры напрямую отражают интегральный эффект неблагоприятных факторов среды на метаболические процессы [6], [10]. Высота побегов пшеницы не изменялась в условиях засоления. Однако, инокуляция семян растений штаммом эндофитных бактерий PS-51 привела к увеличению высоты растений на 12% в сравнении с неинокулированными растениями при засолении (рис. 1а). Площадь и сырая масса флагового листа пшеницы существенно снижалась при засолении в сравнении с контролем (НС), на 12 и 17%, соответственно. В то же время у пшеницы, инокулированной PGPEB, эти негативные эффекты нивелировались: площадь и сырая масса листа были сопоставимы с неинокулированными растениями (рис. 1б).

Полученные данные свидетельствуют о том, что штамм PS-51 оказывал выраженное стимулирующее действие на ростовые процессы, вероятно, за счёт оптимизации водного статуса растений и поддержания активности клеточного деления и растяжения в стрессовых условиях. Сохранение параметров флагового листа имеет особое значение, поскольку он вносит основной вклад в формирование ассимилятов, определяющих продуктивность пшеницы [10].

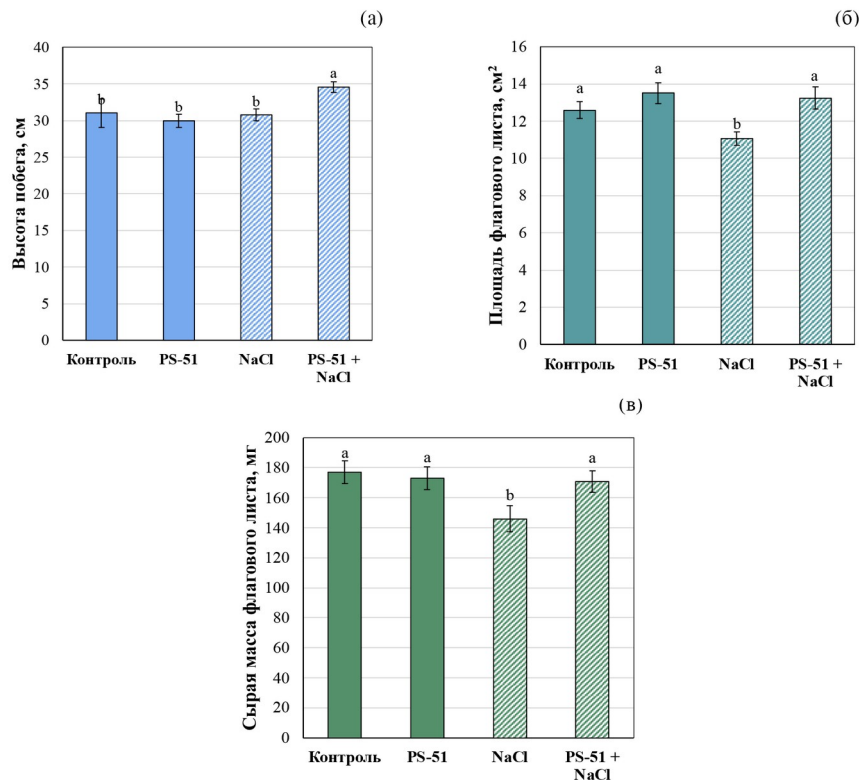


Рисунок 1 - Высота растений (а), площадь (б) и сырая масса (в) флагового листа пшеницы по завершению эксперимента

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.17.1>

Примечание: хл – хлорофилл; разными латинскими буквами обозначены достоверные различия между вариантами при $p < 0,05$

Накопление осмопротекторов является одним из универсальных механизмов адаптации растений к засолению [5]. При инокуляции семян пшеницы солеустойчивым штаммом эндофитных бактерий PS-51 в условиях избытка NaCl в субстрате содержание пролина возрастало на 19%, водорастворимых сахаров — на 16% в сравнении с неинокулированными растениями (рис. 2аб). Известно, что пролин выполняет не только осмозащитную, но и антиоксидантную функцию, тогда как растворимые сахара участвуют в защите клеточных компонентов и регуляции энергетического обмена [14]. Усиление их накопления может являться одной из адаптивных реакций, направленных на повышение устойчивости растений к солевому стрессу.

Изменение количества фотосинтетических пигментов можно рассматривать как маркер окислительного стресса и показатель, который тесно связан с продукционным процессом у растений [1], [4]. В условиях NaCl-засоления у неинокулированных растений содержание Хл *a* во флаговом листе снижалось на 5%, тогда как содержание Хл *b* не изменялось в сравнении с НС-контролем (рис. 2в).

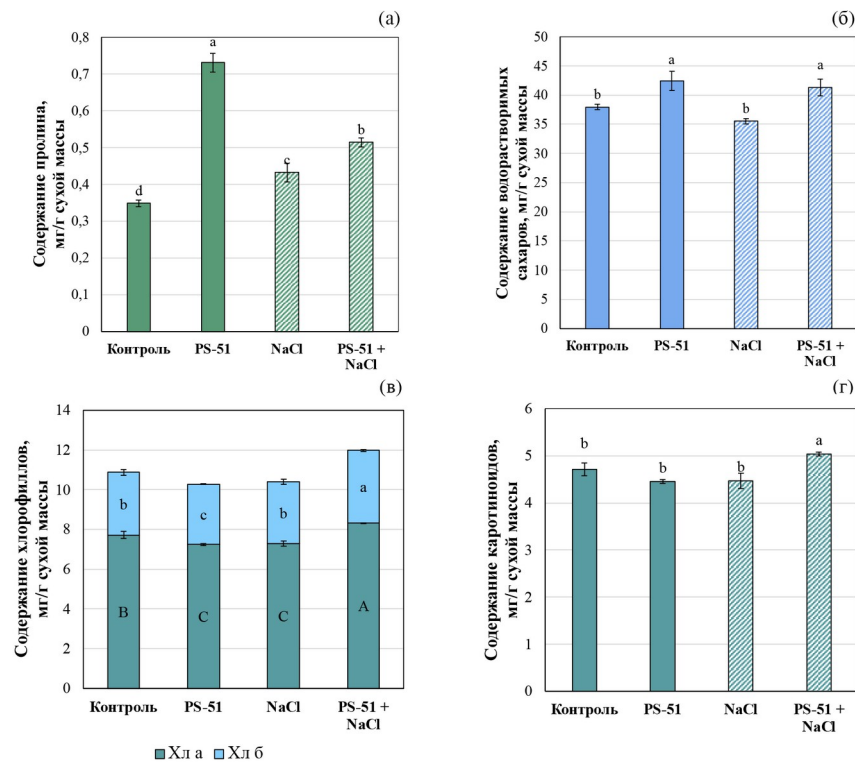


Рисунок 2 - Содержание пролина (а), водорастворимых сахаров (б), хлорофиллов (в) и каротиноидов (г) во флаговом листе пшеницы по завершению эксперимента

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.17.2>

Примечание: хл – хлорофилл; разными латинскими буквами (прописными и строчными) обозначены достоверные различия между вариантами при $p < 0,05$

Способность некоторых штаммов солеустойчивых PGP-бактерий повышать содержание фотосинтетических пигментов в листьях злаков показана в ряде исследований [7], [8]. Выявлено достоверное стимулирующее влияние штамма PGPEB PS-51 на накопление фотосинтетических пигментов в условиях засоления: содержание Хл а и Хл б возросло на 14 и 17%, соответственно, в сравнении с неинокулированным контролем. При этом содержание каротиноидов увеличивалось на 13% (рис. 2г), тогда как у неинокулированных растений наблюдалось их снижение на 5% относительно бессолевого НС-контроля. Повышение содержания фотосинтетических пигментов при инокуляции штаммом PS-51 может быть связано как с усилением антиоксидантной защиты, так и с регуляцией фитогормонального статуса растений под действием эндофитных бактерий [7], [8], [15]. Кроме того, увеличение уровня каротиноидов, выполняющих фотопротекторную функцию, указывает на возможное участие бактерии в защите фотосинтетического аппарата от повреждения активными формами кислорода [16]. В совокупности это свидетельствует о том, что штамм PS-51 способствовал стабилизации фотосинтетического аппарата и поддержанию продукционных процессов пшеницы в условиях засоления.

Инокуляция штаммом PGPEB PS-51 оказывала выраженное ростстимулирующее действие на растения пшеницы, что проявилось в увеличении высоты побега, а также в улучшении морфометрических характеристик флагового листа. Наряду с этим отмечено усиление накопления низкомолекулярных осмопротекторов, включая пролин и водорастворимые сахара, что может свидетельствовать об активации адаптивных механизмов, направленных на поддержание клеточного гомеостаза в условиях NaCl-засоления.

Заключение

Проведённое исследование показало, что предпосевная инокуляция семян *Triticum aestivum* ростстимулирующими эндофитными бактериями (PGPEB штамм PS-51) способствует улучшению ряда ключевых морфофизиологических показателей растений в условиях умеренного NaCl-стресса. Установлено увеличение высоты побега, биомассы и площади флагового листа у 56-дневных растений, а также повышение содержания фотосинтетических пигментов и осмопротекторных соединений, таких как пролин и водорастворимые сахара. Совокупность полученных данных указывает на способность штамма PS-51 усиливать адаптивный потенциал растений при засолении, что позволяет рассматривать его как перспективный компонент биопрепаратов, предназначенных для повышения солеустойчивости пшеницы и других культур. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение молекулярно-генетических характеристик выделенного штамма.

**Финансирование**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-76-10062, <https://rscf.ru/project/24-76-10062/>.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was supported and funded by Russian Science Foundation, Project No. 24-76-10062, <https://rscf.ru/project/24-76-10062/>.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kizilgeci F. Normalized difference vegetation index and chlorophyll content for precision nitrogen management in durum wheat cultivars under semi-arid conditions / F. Kizilgeci, M. Yildirim, M. Islam [et al.] // *Sustainability*. — 2021. — Vol. 13. — P. 3725. — DOI: 10.3390/su13073725.
2. Giraldo P. Worldwide research trends on wheat and barley: a bibliometric comparative analysis / P. Giraldo, E. Benavente, F. Manzano-Agugliaro [et al.] // *Agronomy*. — 2019. — Vol. 9. — P. 352. — DOI: 10.3390/agronomy9070352.
3. Cuevas J. A review of soil-improving cropping systems for soil salinization / J. Cuevas, I.N. Daliakopoulos, F. del Moral [et al.] // *Agronomy*. — 2019. — Vol. 9. — P. 295. — DOI: 10.3390/agronomy9060295.
4. EL Sabagh A. Salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) in the changing climate: adaptation and management strategies / A. EL Sabagh, M.S. Islam, M. Skalicky [et al.] // *Frontiers Agronomy*. — 2021. — Vol. 3. — P. 661932. — DOI: 10.3389/fagro.2021.661932.
5. Liu J. ROS homeostasis and plant salt tolerance: plant nanobiotechnology updates / J. Liu, C. Fu, G. Li [et al.] // *Sustainability*. — 2021. — Vol. 13. — P. 3552. — DOI: 10.3390/su13063552.
6. Nassar R. Physiological and anatomical mechanisms in wheat to cope with salt stress induced by seawater / R. Nassar, H.A. Kamel, A. Ghoniem [et al.] // *Plants*. — 2020. — Vol. 9. — P. 237. — DOI: 10.3390/plants9020237.
7. He X. Endophytic plant growth promoting bacteria from two halophytes improve wheat performance under salt stress / X. He, H. Yuan, Y. Li [et al.] // *Frontiers Plant Science*. — 2026. — Vol. 17. — P. 1658930. — DOI: 10.3389/fpls.2026.1658930.
8. Abd Allah E.F. Endophytic bacterium *Bacillus subtilis* (BERA 71) improves salt tolerance in chickpea plants by regulating the plant defense mechanisms / E.F. Abd Allah, A.A. Alqarawi, A. Hashem [et al.] // *Journal of Plant Interactions*. — 2018. — Vol. 13(1). — P. 37–44. — DOI: 10.1080/17429145.2017.1414321.
9. Srivastava P. Optimization of sterilization parameters for isolation of endophytes from *Allium sativum* and exploring its antibacterial activity / P. Srivastava, S.P. Tiwari, A.K. Srivastava [et al.] // *Journal of Pure and Applied Microbiology*. — 2024. — Vol. 18. — P. 961–979. — DOI: 10.22207/JPAM.18.2.11.
10. Kumar P. Characterization of flag leaf morphology identifies a major genomic region controlling flag leaf angle in the US winter wheat (*Triticum aestivum* L.) / P. Kumar, H.S. Gill, M. Singh [et al.] // *Theoretical and Applied Genetics*. — 2024. — Vol. 137. — P. 205. — DOI: 10.1007/s00122-024-04701-1.
11. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes / H.K. Lichtenthaler // *Methods in Enzymology*. — 1987. — Vol. 148. — P. 350–382. — DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1.
12. Maleva M. Adaptive redox reactions promote naturalization of rare orchid *Epipactis atrorubens* on serpentine dumps post asbestos mining / M. Maleva, G. Borisova, E. Filimonova [et al.] // *Horticulturae*. — 2022. — Vol. 8. — P. 603. — DOI: 10.3390/horticulturae8070603.
13. Denova-Lozano, P. Determination of total soluble sugars in pteridophytes using the anthrone method / P. Denova-Lozano, A. Chamorro-Flores, A. B. Cerón-Carpio [et al.] // *Protocols*. — 2026. — Vol. 6. — P. e70373. — DOI: 10.1002/cpz1.70373.
14. Keunen E. Plant sugars are crucial players in the oxidative challenge during abiotic stress: extending the traditional concept / E. Keunen, D. Peshev, J. Vangronsveld [et al.] // *Plant, Cell & Environment*. — 2013. — Vol. 36 (7). — P. 1242–1255. — DOI: 10.1111/pce.12061.
15. Egamberdieva D. Alleviation of salt stress by plant growth regulators and IAA producing bacteria in wheat / D. Egamberdieva // *Acta Physiologiae Plantarum*. — 2009. — Vol. 31 (4). — P. 861–864. — DOI: 10.1007/s11738-009-0297-0.
16. Ashraf M. Photosynthesis under stressful environments / M. Ashraf, P.J.C Harris // *Photosynthetica*. — 2013. — Vol. 51 (2). — P. 163–190. — DOI: 0.1007/s11099-013-0021-6.