

Растения подсолнечника, обработанные ризобактериями, характеризовались хорошей биомассой и накапливали мышьяка на 25 % больше, чем необработанные контрольные растения, но меньше, чем обработанные ауксином растения. Наибольшее снижение содержания общего мышьяка в почве (70 %) наблюдалось в варианте подсолнечник и ИУК.

При обработке бактериальным препаратом семян расторопши содержание мышьяка в растительной ткани меньше на 30 % по сравнению с контролем. У льна, при обработке биопрепаратом, снижение составило 14%. Однако количество мышьяка в почве в этих двух вариантах было снижено на 50% от исходного содержания мышьяка (25 мг/кг), причем оно было больше, чем на контроле. Скорее всего, такое снижение уровня загрязнения при одновременном уменьшении тканевого накопления связано с большой растительной биомассой в этих вариантах и с более высокой устойчивостью растений к загрязнению, вызванной инокуляцией. Ранее, на примере яровой пшеницы было показано, что растения, инокулированные азоспириллами, накапливают мышьяка меньше, чем поверхностно стерилизованные неинокулированные [11].

Заключение. Это исследование продемонстрировало, что PGPR-бактерии препарата Azospirillum и продукты их вторичного метаболизма могут влиять на уровень накопления мышьяка в биомассе и развитие льна, расторопши и подсолнечника. Обработка ИУК в дозе 10^{-5} мг/л увеличивает содержание мышьяка в растительной биомассе, что можно использовать в процессах восстановления почв. Обработка биопрепаратом положительно влияет на развитие растений, увеличивает биомассу, но не усиливает транслокацию мышьяка растениями, что важно при использовании биопрепаратов в производстве фармакологической и сельскохозяйственной продукции.

Литература

1. Raju N. J. Arsenic in the geo-environment: A review of sources, geochemical processes, toxicity and removal technologies //Environmental research. – 2022. – Т. 203. – С. 111782.
2. Punshon T., Jackson B. P., Meharg A. A., Warczack T., Scheckel K., Guerinot M. L. Understanding arsenic dynamics in agronomic systems to predict and prevent uptake by crop plants //Science of the Total Environment. – 2017. – V. 581. – P. 209-220.
3. Mkandawire M. and E. G. Dudel, Accumulation of arsenic in Lemna gibba L. (duckweed) in tailing waters of two abandoned uranium mining sites in Saxony, Germany // Sci. Total Environ. – 2005. – V. 336. – P. 81–89.
4. Shraim A. M. Rice is a potential dietary source of not only arsenic but also other toxic elements like lead and chromium //Arabian Journal of Chemistry. – 2017. – V. 10. – P. S3434-S3443.
5. Vaculík M., Jurkovič L., Matejkovi, P., Molnár M., Lux A. Potential risk of arsenic and antimony accumulation by medicinal plants naturally growing on old mining sites //Water, Air, & Soil Pollution. – 2013. – V. 224. – №. 5. – P. 1-16.
6. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation //Journal of chemistry. – 2019. – V. 2019.
7. Ali H., Khan E., Sajad M. A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications //Chemosphere. – 2013. – V. 91. – №. 7. – P. 869-881.
8. Majeed A., Muhammad Z., Ahmad H. Plant growth promoting bacteria: role in soil improvement, abiotic and biotic stress management of crops //Plant cell reports. – 2018. – V. 37. – №. 12. – P. 1599-1609.
9. Bashan Y., De-Bashan L. E. How the plant growth-promoting bacterium Azospirillum promotes plant growth—a critical assessment //Advances in agronomy. – 2010. – V. 108. – P. 77-136.
10. Lyubun Ye. V., Kosterin P. V., Zakharova E. A., Shcherbakov A. A., and Fedorov E. E., “Arsenic-contaminated soils: phytotoxicity studies with sunflower and sorghum”//J. Soils Sediment –2002. – V. 2.— P. 143–147.
11. Lyubun Ye. V., Fritzsche A., Chernyshova M. P., Dudel E. G., and Fedorov E. E., Arsenic transformation by Azospirillum brasilense Sp245 in association with wheat (*Triticum aestivum* L.) roots // Plant Soil. – 2006. – V. 286 – P. 219–227.
12. Baldani V. L. D., Baldani J. I., Döbereiner J. Inoculation of field-grown wheat (*Triticum aestivum*) with *Azospirillum* spp.//Brasil. Biol. Fertil. Soils – 1989 -V. 4 – P. 37–40.

EFFECT OF AUXIN ON ARSENIC TRANSLOCATION IN MEDICINAL PLANTS

^{1,2} Lyubun E.V. PhD, ^{1,2} Shumikhina A.N., ³ Shumikhin A.E., ¹ Malysh E.V.

¹VNIIAgrokhimii 127434, Moscow, st. Pryanishnikova, 31a, tel. (499) 976-37-50, E-mail: lyubun@vniia-pr.ru

²Institute of Biochemical Technology and Nanotechnology, Peoples' Friendship University of Russia, 117198, Moscow, st. Miklukho-Maklaya, 10, building 2

³FBUN "FNTSG im. F. F. Erisman "Rosptrebnadzor, 141014, Moscow region, city of Mytishchi, Semashko street, 2

Obtaining ecologically pure pharmacologically significant plants and food products is an important task. In this work, we used plants whose cultivation technology is well developed and widely distributed: flax, milk thistle, and sunflower. This work demonstrated that seed treatment with the auxin phytohormone, indole-3-acetic acid, increased the content of arsenic in plant biomass. The treatment of plant seeds with a biological product containing bacteria of the genus *Azospirillum* affects the level of arsenic accumulation in the biomass and the development of plants.

Keywords: arsenic, bioaccumulation, growth-promoting rhizobacteria, phytohormones.

УДК 633:57.045

DOI: 10.25680/S19948603.2022.129.23

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ПОГЛОТИТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ РАСТЕНИЙ (^{15}N)

Л.В. Осипова, д.б.н., Т.Л. Курносова, к.б.н., И.А. Быковская,

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова»

(ФГБНУ «ВНИИ агрохимии»)

127550, Россия, г. Москва, ул. Прянишникова, 31А

E-mail: legos4@yandex.ru

Установлена реакция растений на изменение обеспеченности основными элементами, предпосевную обработку семян (ПОС) соединениями селена и кремния при действии абиотического стресса. Показано, что поглотительная функция корневой системы находится в соответствии с общей направленностью метаболизма.

Ключевые слова: ячмень, ^{15}N , поглотительная способность корневой системы, продуктивность, малоновый диальдегид (МДА), фотосинтетические пигменты.

Глобальное изменение климата привело за два последних десятилетия к возникновению рисков, связанных с ростом неблагоприятных воздействий и падению урожайности на 10-30%. Прогнозные климатические сценарии свидетельствуют, что при отсутствии адаптационных мер, направленных на предотвращение негативных тенденций, урожай сельскохозяйственных культур на территории земледельческой зоны РФ будет сокращаться, и к 2030 г. снизится на 11,7%, а к 2050 г. – на 15,8% [1].

Решение этой проблемы осуществляется разработкой адаптивных технологий, повышающих устойчивость растений к стрессам, которые базируются на изучении механизмов и стратегии онтогенетической адаптации культур.

Теоретической основой разработки способов повышения реализации адаптивного потенциала продуктивности и рационального использования минеральных удобрений является изучение корневого питания растений. Корневое питание, как фактор управления продуктивностью, широко и многосторонне освещено [1-8].

В последние годы возрос интерес исследователей к особенностям адаптации корневой системы в связи с устойчивостью к абиотическим стрессам и урожайностью культур [9, 10].

Один из способов исследования деятельности корневой системы – оценка ее поглощательной способности. Метод изотопной индикации, когда в корнеобитаемую среду вносят ничтожно малые концентрации меченого азота (^{15}N), которые не влияют на метаболические пути, позволяет судить о поведении обычного, немеченого элемента. Он также применяется для решения вопросов биологической фиксации азота, в исследованиях по превращению азотных удобрений в почве, их ассимиляции растениями и др. [11-13].

Поглотительная способность корней при действии абиотических стрессов меньше исследована.

Цель наших исследований – изучить влияние оксидативного стресса на поглощение ^{15}N корневой системой и физиолого-биохимические параметры надземной части растений в различных условиях минерального питания.

Методика. Для изучения влияния факторов среды на поглощательную активность корневой системы ярового ячменя сорта Нур использовали метод изотопной индикации. Низкие концентрации меченого азота ^{15}N вносили в корнеобитаемую среду в различные периоды онтогенеза и через короткие временные интервалы определяли поступление в растение ^{15}N , по интенсивности накопления которого судили об активности корневой системы растений. Размеры поступления в растения внесенного ^{15}N рассчитывали по формуле изотопного разведения [14]. Полученные данные сопоставляли с физиологическим статусом растений, определяя морфометрические параметры, содержание фотосинтетических пигментов, оводненность листьев и апекса главного побега, содержание МДА – показателя уровня свободнорадикального окисления в норме и при стрессовом воздействии, и продуктивность ячменя [15]. Исследования проводили в лабораторных и вегетационных опытах. Корневую деятельность ячменя оценивали при действии осмотическо-

го стресса, при влиянии алюминиевой токсичности и действии тяжелого металла кадмия.

Агрохимическая характеристика в вегетационных опытах дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы: гумус – 2,1%, pH_{KCl} 4,5; H_f – 4,2 мг-экв/100 г почвы; S – 12,0 мг-экв/100 г почвы; T – 13,2 мг-экв/100 г почвы; V – 74%; P_2O_5 – 93 мг/кг; K_2O – 82 мг/кг сухой почвы; изучали влияние двух фонов минерального питания: $(\text{NPK})_{100}$ – I фон; $(\text{NPK})_{300}$ – II фон. Оценивали также действие предпосевной обработки семян протекторными соединениями: селеном (0,01%-ный раствор Na_2SeO_3) и кремнием (0,15%-ный раствор Na_2SiO_3).

Результаты и их обсуждение. Для оценки влияния разных стрессоров на поглощательную активность корневой системы на первых этапах органогенеза проросшие семена помещали на осмотически активные растворы сахарозы, а также алюминия и кадмия различной концентрации. С помощью метода изотопной индикации определяли поступление ^{15}N в зерновку, корни и надземную часть проростка. В результате проведенных экспериментов установлены общие реакции ячменя на различные виды стрессоров. Показано, что под их воздействием снижаются линейные размеры проростков, уменьшается количество ^{15}N , поступившее в корни, ростики и зерновку. Поглощательная функция корней снижалась с увеличением концентрации токсикантов. Все изученные стрессы, снижая активность метаболизма, изменяли перераспределение поступившей метки (^{15}N) между органами проростка, задерживая отток пластических веществ из зерновки в надземные органы. Предобработка семян биогенными элементами селеном и кремнием на первых этапах органогенеза несколько тормозила поступление ^{15}N , однако способствовала передвижению поглощенного меченого азота в подземную часть проростков. Это приводило к активации процесса дэтиоляции, оптимизировало образование фотосинтетических пигментов и активацию фотосинтеза, что, в свою очередь, обеспечило увеличение поглощательной активности корневой системы.

Отмечены также специфические особенности действия различных стрессоров на падение скорости поглощательной функции корневых систем при нарастании стрессора, что, однако, не повлияло на эффективность предпосевной обработки семян ячменя.

Изучение функционирования корневых систем ячменя в вегетационных опытах показало, что поглощательная активность корней зависит от обеспеченности растений основными минеральными элементами, от продолжительности действия стрессора и обработки семян протекторными соединениями селена и кремния, а также отражает сортовую специфику корневого питания ячменя.

В оптимальных условиях культивирования увеличение фона минерального питания способствовало активации поглощательной функции ячменя. В период колошения при формировании генеративных органов, количество поглощенного азота ^{15}N , внесенного с поливными водами за 6 суток определения составило: на фоне II – 46% внесенной дозы, на фоне I – 38% (рис. 1).

Определение ^{15}N за отдельные периоды показало, что в первые часы после внесения метки на высоком

минеральном фоне отмечалось торможение накопления ^{15}N . Однако, в следующие двое суток и до конца экспо-

зиции интенсивность его поступления в надземную массу была выше, чем на фоне I.

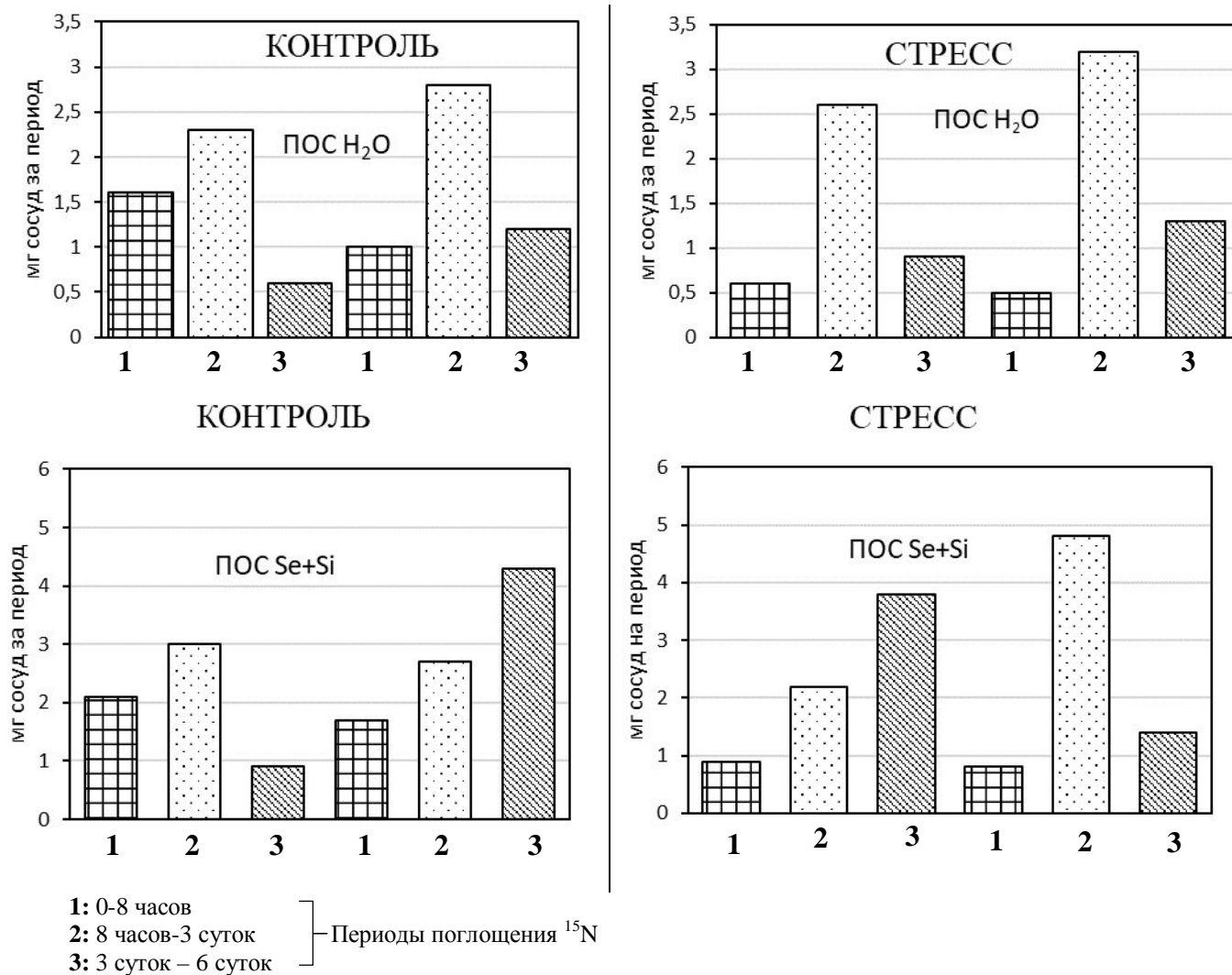


Рис. 1. Поглощение ^{15}N растениями ячменя в зависимости от фона питания, ПОС (Se+Si) и действия стресса

Увеличение поглотительной способности корневой системы ячменя при возрастании обеспеченности минеральным питанием обусловлено совокупностью процессов, определяющих величину надземной массы: увеличением ассимиляционной поверхности, о чем свидетельствуют возрастание фотосинтетического потенциала с $1195 \text{ см}^2/\text{растение}$ на фоне I до $1440 \text{ см}^2/\text{раст}$ на фоне II и увеличение содержания фотосинтетических пигментов, что определяло скорость накопления ассимилятов.

Обеспеченность основными минеральными элементами обуславливала уровень свободнорадикального окисления, оцениваемого по содержанию малонового диальдегида, продукта перекисного окисления липидов мембран, образующегося под влиянием активных форм кислорода (АФК). В благоприятных условиях культивирования АФК выполняют важные функции, обеспечивающие сбалансированное течение физиолого-биохимических процессов. На II фоне минерального питания содержание МДА было на 40% выше, чем на I фоне, что свидетельствует о более высокой интенсивности метаболизма.

При действии абиотического стресса, индуцированного прекращением полива, при наступлении VI этапа органогенеза до влажности устойчивого завядания растений, наблюдалось постепенное снижение погло-

тительной активности корневой системы. Это обусловлено развитием адаптивных реакций, направленных на сохранение жизнеспособности организма. Отмечались торможение роста надземной массы, перераспределение потоков воды к апексу главного побега, что снижало оводненность листьев и приводило к перестройке фотосинтетического аппарата. Уменьшилась активность антенной функции и возросла протекторная роль хлорофилла *b* и каротиноидов. Быстрое приспособление к изменяющимся внешним условиям обеспечивается процессом постоянного распада и синтеза молекул хлорофилла (Иванов, 2020), что регулирует активность фотосинтетического аппарата и накопление ассимилятов.

В соответствии с общим изменением метаболизма снижалась и активность поглощения ^{15}N . Изменения поступления ^{15}N по изучаемым периодам зависели от фона минерального питания аналогично контролю (см. рис. 1).

Применение биогенных элементов способствовало возрастанию поглотительной активности корневой системы как в благоприятных условиях среды, так и при стрессовом воздействии, что связано с возросшей под влиянием этих элементов надземной биомассой.

Возрастание фона питания и ПОС селеном и кремнием не только увеличивало поступление ^{15}N в растения,

но и способствовало его повышенной ассимиляции – включения в белки надземной массы.

Условия минерального питания и применения Se + Si в виде предпосевной обработки семян при действии абиотического стресса влияли на физиолого-

биохимический статус надземной биомассы и сопряженную поглотительную активность корневой системы и определяли стратегию формирования и величину продуктивности ярового ячменя (рис. 2).

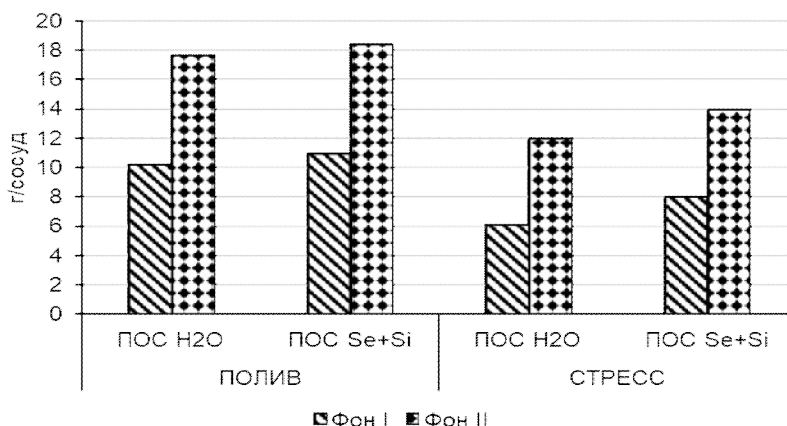


Рис. 2. Продуктивность ячменя на различных фонах питания в зависимости от действия стресса и ПОС Se+Si

Заключение. Поглотительная активность корневой системы находится в соответствии с общей направленностью метаболизма и зависит от условий культивирования. Установлено, что поглощение меченого азота в короткие временные интервалы на отдельных этапах органогенеза можно рассматривать как показатель, характеризующий влияние внешних факторов и устойчивость растений.

Литература

1. Катцов В.М. Развитие технологии вероятного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики //Труды Главной географической обсерватории им. А.И. Войкова. - 2019. - № 593. - С. 6-52.
2. Прянишников Д.Н. Азот в жизни растений и в земледелии. СССР. Избр. соч. - М.: Из-во АН СССР, 1951. Т. 1. - С. 47-156.
3. Сабинин Д.А. Физиологические основы питания растений. - М.: Изд-во АН СССР, 1955. - 512 с.
4. Салеев Р.К., Пузанов В.И. Свободное пространство и гомеостаз растительной клетки //Доклады Академии наук СССР. - 1984. - Т. 276. - 1022 с.
5. Ринькас Г.Я. Оптимизация минерального питания растений //Известия АН Латвийской ССР. - 1986. - № 9. - С. 34-42.

6. Журбицкий З.И. Физиологические и агрохимические основы применения удобрений. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 293 с.
7. Сатклифф Дж.Ф. Поглощение минеральных солей растениями. - М: Мир, 1964. - 221 с.
8. Вахмистров Д.Б. О двух механизмах избирательности при поглощении растениями элементов минерального питания //Физиология растений. - 1966. - Т. 13. - №5. - С. 807-813.
9. Якушев В. П., Лекомцев П. В., Матвеев Д. А., Петрушин А. Ф., Якушев В. В. Применение дистанционного зондирования в системе точного земледелия //Вестн. сельскохозяйственной науки. - 2015. - № 1. - С. 23-25.
10. Кошкин Е.И., Гусейнов Г.Г. Экологическая физиология сельскохозяйственных культур. - М., 2020. - 576 с.
11. Кореньков Д.А., Борисова Н.И. Успехи и перспективы использования стабильных изотопов в агрохимии //Вестник с.-х. науки. - 1980. - № 9. - С. 22-27.
12. Смирнов П.М. Вопросы агрохимии азота в исследованиях с ¹⁵N. - //Агрохимия. - 1977. - № 1. - С. 3.
13. Завалин А.А. Биологический и минеральный азот в земледелии России. - М.: Изд-во ВНИИА, 2022. - 256 с.
14. Юдин Ф.А. Методика агрохимических исследований. - М.: Колос, 1980. - 366 с.
15. Осипова Л.В., Ерошенко Л.М., Курносова Т.Л., Быковская И.А. Влияние минерального питания на устойчивость сортов ярового ячменя к оксидативному стрессу //Плодородие. - 2021. - № 5. - С. 52-56.

UDK 633:57.045

INFLUENCE OF FACTORS ON THE ABSORPTION CAPACITY OF THE ROOT SYSTEM (¹⁵N)

L.V. Osipova, Dr. Sc. (Biol.); T.L. Kurnosova, C. Sc. (Biol.);

I.A. Bykovskaya

Pryanishnikov Research Institute of Agricultural Chemistry,

Federal Agency Research Organization, ul. Pryanishnikova 31a, Moscow, 127550, Russia;

The studies established the reaction of plants to changes in the availability of basic elements, pre-sowing treatment of seeds (PIC) with selenium and silicon compounds under the influence of abiotic stress. It is shown that the absorption function of the root system is in accordance with the general direction of metabolism.

Keywords: barley, ¹⁵N, absorption capacity of the root system, productivity, malondialdehyde (MDA), photosynthetic pigments