



DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2022.1.6>

UDC 575.112

LBC 28c51



STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ANALYSIS OF MANGANESE- AND ZINC-DEPENDENT PROTEINS IN PLANTS GROWING IN THE SOUTH OF RUSSIA

Pavel A. Krylov

Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

Aliya A. Abdulova

Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

Oleg V. Permyakov

Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

Valery V. Novochadov

Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

Abstract. Modern bioinformatic approaches allow structural and functional analysis of proteins of various organisms for the presence of homologous and non-homologous sites. This study is aimed at identifying structural and functional differences of manganese- and zinc-dependent proteins in common plant species growing on the territory of arid biocenoses of Southern Russia. The main purpose of the work was to study the presence of manganese- and zinc-dependent proteins included in the proteome of common plant species typical of arid territories of Southern Russia. As a result of the analysis of the plant proteome for the presence of manganese- and zinc-dependent proteins, it was found that the degree of study was very low, the number of annotated proteins was 5 pieces only for *Artemisia annua* and *Artemisia lercheana*, while there was no protein annotation at all for other species. Later, using a bioinformatic search, the presence of a manganese-permeable Photosystem II protein D1 protein and a zinc-dependent Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta was found in all plants. Structural analysis of sequences using multiple alignment showed that there are strong structural differences in the manganese-dependent Photosystem II protein D1 protein between *Artemisia lercheana*, *Artemisia annua*, *Cichorium intybus*, *Descurainia Sophia*, *Tripleurospermum inodorum* and *Xanthium albinum*, and for the zinc-dependent protein Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta in *Artemisia lercheana*, *Artemisia annua*, *Cichorium intybus* and *Descurainia sophia*, which is associated with a variety of amino acid substitutions, including conservative and weakly conservative sites. The obtained results of the study showed a low degree of knowledge and description of the structural and functional properties of metal-dependen.

Key words: metal-dependent proteins, manganese, zinc, bioinformatics, multiple alignment, plants of arid biocenoses.

Citation. Krylov P.A., Abdulova A.A., Permyakov O.V., Novochadov V.V. Structural and Functional Analysis of Manganese- and Zinc-Dependent Proteins in Plants Growing in the South of Russia. *Prirodnye sistemy i resursy* [Natural Systems and Resources], 2022, vol. 12, no. 1, pp. 45-53. DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2022.1.6>

**СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
МАРГАНЕЦ- И ЦИНК-ЗАВИСИМЫХ БЕЛКОВ
У РАСТЕНИЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ НА ЮГЕ РОССИИ****Павел Андреевич Крылов**

Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация

Алия Аликовна Абдулова

Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация

Олег Валерьевич Пермяков

Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация

Валерий Валерьевич Новочадов

Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Современные биоинформационные подходы позволяют проводить структурно-функциональный анализ белков различных организмов на наличие гомологичных и негомологичных участков. Данное исследование направлено на выявление структурно-функциональных различий марганец- и цинк-зависимых белков у распространенных видов растений, произрастающих на территории аридных биоценозов Юга России. Основной целью работы являлось изучение наличия марганец- и цинк-зависимых белков, входящих в протеом распространенных видов растений, типичных для аридных территорий Юга России. В результате анализа протеома растений на наличие марганец- и цинк-зависимых белков было обнаружено, что степень изученности очень низка, число аннотированных белков составило 5 штук только для *Artemisia annua* и *Artemisia lercheana*, в то время как для других видов аннотация белков вообще отсутствовала. В дальнейшем с помощью биоинформационного поиска было обнаружено наличие общего у всех растений марганец-зависимого белка Photosystem II protein D1 и цинк-зависимого Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta. Структурный анализ последовательностей с помощью множественного выравнивания показал, что имеются сильные структурные различия в марганец-зависимом белке Photosystem II protein D1 между *Artemisia lercheana*, *Artemisia annua*, *Cichorium intybus*, *Descurainia sophia*, *Tripleurospermum inodorum* и *Xanthium albinum*, а для цинк-зависимого белка Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta – у *Artemisia lercheana*, *Artemisia annua*, *Cichorium intybus* и *Descurainia sophia*, что связано с множеством замен аминокислот, в том числе консервативных и слабоконсервативных участков. Полученные результаты исследования показали низкую степень изученности и описания структурно-функциональных свойств металл-зависимых белков у доминирующих растений, произрастающих на Юге России.

Ключевые слова: металл-зависимые белки, марганец, цинк, биоинформатика, множественное выравнивание, растения Юга России.

Цитирование. Крылов П. А., Абдулова А. А., Пермяков О. В., Новочадов В. В. Структурно-функциональный анализ марганец- и цинк-зависимых белков у растений, произрастающих на Юге России // Природные системы и ресурсы. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 45–53. – DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2022.1.6>

Введение. Изучение металл-зависимых белков, входящих в протеом растений, позволит выявить белки, участвующие в регулировании метаболизма. Такие элементы, как Mn и Zn, относят к жизненно необходимым элементам питания растений при условии их содержания в незначительных концентрациях. Когда концентрации биогенных микроэлементов возрастают, они

также становятся токсичными. Иными словами, если быть точным, нет токсичных элементов, а есть их токсичные концентрации [4; 5; 7]. Отклик растений на влияние тяжелых металлов зависит от видовой принадлежности, экотипа, стадии роста, концентрации металлов, времени экспозиции и по-разному проявляется на различных уровнях организации биологических систем [1].

Марганец является одним из основных микроэлементов. Он играет важную роль как компонент множества ферментов, участвующих в фотосинтезе (фотосистема II), антиоксидантной защите клеток, реакциях окисления, карбоксилирования, метаболизма углеводов, реакциях фосфора и цикле лимонной кислоты [3; 4; 6]. Дефицит Mn может быть серьезным нарушением питания растений в почвах с высоким pH и высоким парциальным давлением O₂, где биологическая доступность Mn может снижаться намного ниже уровня, необходимого для нормального роста растений [8]. Цинк входит в состав ферментов, обеспечивающих синтез аминокислоты – триптофана, являющегося прямым предшественником другого физиологически значимого вещества – индолилуксусной кислоты, входящей в одну из важнейших групп гормонов растений. Присутствие этого металла также необходимо для регуляции экспрессии генома, обеспечиваемой цинк-содержащими факторами транскрипции [4; 9].

В связи с этим марганец и цинк являются эссенциальными металлами для подавляющего большинства растений, особенности их метаболизма у отдельных видов приводят к различиям в потребности этих металлов. Исследования показали, что высокие концентрации марганца и цинка в почве способствуют росту и развитию таких доминантов и субдоминантов аридных фитоценозов, как *Artemisia lercheana* и *Atriplex tatarica*, но препятствуют активному росту *Cichorium intybus*, *Descurainia sophia*, *Lactuca tatarica*, *Tripleurospermum inodorum* и *Xanthium albinum*, *Artemisia absinthium* [2].

Цель работы – выявить наличие и структурно-функциональные особенности марганец- и цинк-зависимых белков у доминирующих растений, произрастающих на территории Юга России.

Материалы и методы. Для анализа были выбраны марганец- и цинк-зависимые белки, участвующие в важных для жизнедеятельности растения процессах – фотосинтез, дыхание и защитные механизмы. Чтобы изучить марганец- и цинк-зависимые белки, были отобраны широко распространенные растения Юга России, такие как *Artemisia annua*, *Artemisia lercheana*, *Atriplex tatarica*, *Cichorium intybus*, *Descurainia sophia*, *Lactuca tatarica*,

Tripleurospermum inodorum, *Xanthium albinum*. Одним из наиболее изученных является однолетняя полынь *Artemisia annua*, поэтому конкретные металл-зависимые белки изначально рассматривались на примере ее протеома и затем сравнивались с такими же белками у других растений аридного фитоценоза.

Для биоинформатического анализа использовались базы данных свободного доступа: UniProt (SwissProt/TrEMBL), GeneOntology и KEGG. Поиск белков производился по конструктам следующего типа – taxonomy: “cellular organisms” organism: “cichorium intybus” AND manganese. Рассматривались металлы, входящие в состав кофактора и сайта связывания металлов. Результаты анализа включались в таблицы, построенные с помощью Excel (Microsoft, США), и включали в себя следующие строки: название растений, наличие основной информации о металл-зависимых белках из разных баз данных. Поиск Mn- и Zn-зависимых белков доминантных растений, произрастающих на Юге России, производился путем анализа информации в базах данных UniProt и NCBI. Отбор металл-зависимых белков в UniProt производился по колонкам «Function», «Metal-binding», «Cofactor» и «Binding site».

Для визуализации полученной информации были составлены таблицы общего количества белка, количества аннотированных и неаннотированных марганец- и цинк-зависимых белков и наличия исследуемых белков с их функциями у рассматриваемых растений.

Для определения структурных сходств белков каждого из растений производилось выравнивание их аминокислотных последовательностей с помощью инструмента для множественных выравниваний ClustalOmega (<https://www.ebi.ac.uk/>). Оценка качества выравнивания осуществлялась на основе показателя процента идентичности.

Результаты и их обсуждение. Результаты анализа протеомов растений представлены в таблице 1, где хорошо отражена степень неизученности, несмотря на то, что рассматриваемые растения широко распространены как на Юге России в целом, так и по Волгоградской области. Крупные базы данных содержат мало сведений о количестве, свойствах и функциях белков рассматриваемой флоры. Полностью секвенированный хло-

ропластный геном присутствует только у 3 видов: *Artemisia annua*, *Cichorium intybus*, *Descurainia Sophia*.

Аннотированные металл-зависимые белки присутствуют у 2 видов: 10 у *Artemisia annua* и 4 у *Cichorium intybus*. Тогда как *Artemisia lercheana*, *Atriplex tatarica*, *Descurainia sophia*, *Lactuca tatarica*, *Tripleurospermum inodorum*, *Xanthium albinum* не имеют ни одного аннотированного белка. А протеом таких представителей, как *Artemisia lercheana* и *Xanthium albinum* среди всех используемых баз данных представлен всего одним слабоизученным белком.

Наибольшая часть металл-зависимых белков протеома рассматриваемых растений является неаннотированной, либо вообще не изучены (табл. 2). Для видов *Artemisia lercheana* и *Lactuca tatarica* нет никакой информации о наличии марганец- и цинк-зависимых белках. Самым результативным видом является *Artemisia annua* – единственный представитель, у которого присутствуют аннотированные марганец- и цинк-зависимые белки.

Поскольку марганец- и цинк-зависимые белки, участвующие в таких биологических процессах, как фотосинтез, дыхательная цепь, регуляция клеточного цикла и метаболизма, были отобраны на основе протеома *Artemisia annua*, это растение имеет все анализируемые белки в базе данных UniProt (см. табл. 3).

В связи с тем, что протеомы рассматриваемых растений изучены плохо, большая часть белков у них найдена не была. Mn-зависимый белок Photosystem II protein D1, выполняющий фотосинтетические функции, обнаружен у 6 видов: *Artemisia annua*, *Artemisia lercheana*, *Cichorium intybus*, *Descurainia sophia*, *Tripleurospermum inodorum*, *Xanthium albinum*.

Однако у *Tripleurospermum inodorum* и *Xanthium albinum* известны только частичные последовательности этого белка. Zn-зависимый белок Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta, участвующий в липидном метаболизме, найден у 4 видов: *Artemisia annua*, *Artemisia lercheana*, *Cichorium intybus*, *Descurainia sophia*.

Таблица 1

Белки искомых растений аридных биоценозов в разных базах данных

Растения	Базы данных			Общее количество аннотированных белков
	Общее количество белков			
	UniProt	GeneOntology	KEGG	
<i>Artemisia annua</i>	66482	10	-	15
<i>Artemisia lercheana</i>	1	-	-	-
<i>Atriplex tatarica</i>	7	-	-	-
<i>Cichorium intybus</i>	317	4	-	9
<i>Descurainia sophia</i>	148	-	-	-
<i>Lactuca tatarica</i>	5	-	-	-
<i>Tripleurospermum inodorum</i>	14	-	-	-
<i>Xanthium albinum</i>	1	-	-	-

Таблица 2

Металл-зависимые белки у рассматриваемых растений Юга России согласно базе данных UniProt

Растения	Металл-зависимые белки				
	Общее количество	Аннотированные		Неаннотированные	
		Mn	Zn	Mn	Zn
<i>Artemisia annua</i>	6622	4	1	339	6278
<i>Artemisia lercheana</i>	-	-	-	-	-
<i>Atriplex tatarica</i>	1	-	-	-	-
<i>Cichorium intybus</i>	5	-	-	2	3
<i>Descurainia sophia</i>	5	-	-	2	3
<i>Lactuca tatarica</i>	-	-	-	-	-
<i>Tripleurospermum inodorum</i>	1	-	-	1	-
<i>Xanthium albinum</i>	1	-	-	1	-

Наличие изменений в белках Photosystem II protein D1 у *Artemisia annua*, *Cichorium intybus*, *Descurainia sophia*, *Tripleurospermum inodorum*, *Xanthium albinum* и Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta – у *Artemisia annua*, *Cichorium intybus*, *Descurainia sophia* было выявлено с помощью множественного выравнивания аминокислотных последовательностей этих белков посредством инструмента Clustal Omega. Полученное выравнивание для Photosystem II protein D1 можно считать некачественным, поскольку некоторые из выравниваемых последовательностей были неполными (см. рис. 1). Это может быть причиной того, что данный белок у *Xanthium albinum* в сравнении с другими имеет невысокое сходство (<90 %). Для выравнивания Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta

использовались полные последовательности. По результатам выравнивания можно сказать, что последовательности одного и того же белка рассматриваемых растений сильно отличаются – присутствует множество замен аминокислот, в том числе консервативных и слабоконсервативных, а также делеции и вставки (рис. 2).

Исходя из полученных данных, последовательности Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta имеют низкую идентичность (табл. 4).

Среди известных аминокислотных последовательностей у найденных белков Photosystem II D1 (psbA) растений *Artemisia annua*, *Cichorium intybus*, *Descurainia Sophia*, *Tripleurospermum inodorum*, *Xanthium albinum* есть 2 неполных, наименьший из которых состоит всего из 9 аминокислотных остатков.

Таблица 3

Металл-зависимые белки у рассматриваемых растений Юга России

Белок	Функции	Растения
Mn-зависимые		
Photosystem II protein D1	Фотосинтез (Фотосистема II)	<i>Artemisia annua</i> <i>Artemisia lercheana</i> <i>Cichorium intybus</i> <i>Descurainia sophia</i> <i>Tripleurospermum inodorum</i> <i>Xanthium albinum</i>
Serine/threonine-protein phosphatase PP2A catalytic subunit (EC 3.1.3.16)	Регуляция клеточного цикла	<i>Artemisia annua</i> <i>Artemisia lercheana</i>
S-adenosylmethionine synthase (EC 2.5.1.6)	Катализ образования S-аденозилметионина	<i>Artemisia annua</i> <i>Artemisia lercheana</i>
Isocitrate dehydrogenase [NADP] (EC 1.1.1.42)	Каталитическое окислительное декарбоксилирование изоцитрата	<i>Artemisia annua</i> <i>Artemisia lercheana</i>
S-adenosylmethionine synthase	Катализирует превращение S-аденозилметионина из метионина и АТФ	<i>Artemisia annua</i> <i>Artemisia lercheana</i>
Zn-зависимые		
ATP-dependent zinc metalloprotease FTSH, chloroplastic	Металлопротеиназа	<i>Artemisia annua</i> <i>Artemisia lercheana</i>
Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta (EC 6.4.1.2)	Регуляция метаболизма жирных кислот	<i>Artemisia annua</i> <i>Artemisia lercheana</i> <i>Cichorium intybus</i> <i>Descurainia sophia</i>
Glutamate--tRNA ligase, chloroplastic/mitochondrial (EC 6.1.1.17)	Регуляция тРНК	<i>Artemisia annua</i> <i>Artemisia lercheana</i>
Carbonic anhydrase (EC 4.2.1.1)	Обратимая гидратация углекислого газа	<i>Artemisia annua</i> <i>Artemisia lercheana</i>
Protein arginine methyltransferase (EC 2.1.1.320)	Метилтрансфераза	<i>Artemisia annua</i> <i>Artemisia lercheana</i>
E3 ubiquitin-protein ligase (EC 2.3.2.27)	Убиквитин-лигаза	<i>Artemisia annua</i> <i>Artemisia lercheana</i>
Histidinol dehydrogenase (EC 1.1.1.23)	Окисление L-гистидинола до L-гистидина	<i>Artemisia annua</i> <i>Artemisia lercheana</i>

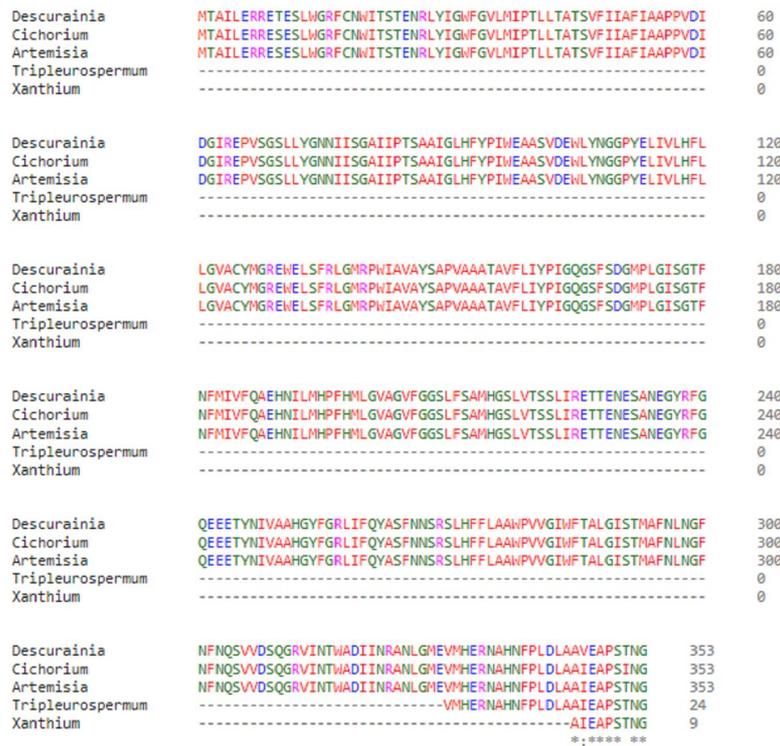


Рис. 1. Множественное выравнивание Photosystem II D1 (psbA)



Рис. 2. Множественное выравнивание Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta

Исходя из этого, и из того, что в ходе полного выравнивания этот короткий фрагмент оказался в самом конце выравнивания, можно удалить переднюю часть последовательностей вплоть до начала этого короткого известного фрагмента последовательности белка (рис. 3). Это можно сделать, поскольку большая отсутствующая часть последовательности у известного фрагмента белка может определиться алгоритмом Clustal Omega как полиморфная область, однако нам извест-

но, что это не делеция, а нехватка информации по белку.

Произведя таким образом выравнивание, получили сравнение концевых участков аминокислотных последовательностей белка Photosystem II D1 (psbA) рассматриваемых растений (рис. 3). Процент сходства таких участков указан в таблице 5. Как видно, процент сходства белков уменьшился по сравнению с тем выравниванием, где использовались полные последовательности белка. Возмож-

```

Descurainia      AVEAPSTNG 9
Artemisia       AIEAPSTNG 9
Tripleurospermum AIEAPSTNG 9
Xanthium        AIEAPSTNG 9
Cichorium       AIEAPSTNG 9
*.*.*.*.*.*.*

```

Рис. 3. Результат множественного выравнивания концевой участка белка Photosystem II D1 (psbA)

Таблица 4

Сравнительный анализ результатов множественного выравнивания марганец-зависимого белка Photosystem II D1 (psbA) и цинк-зависимого белка Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta у растений Юга России

Растения	Проценты идентичности (Percent Identity) psbA (%)				
	<i>Descurainia sophia</i>	<i>Cichorium intybus</i>	<i>Artemisia annua</i>	<i>Tripleurospermum inodorum</i>	<i>Xanthium albinum</i>
<i>Descurainia sophia</i>	100,00	99,15	99,43	95,83	88,89
<i>Cichorium intybus</i>	99,15	100,00		95,83	88,89
<i>Artemisia annua</i>	99,43	99,72	100,00	100,00	100,00
<i>Tripleurospermum inodorum</i>	95,83	95,83	100,00	100,00	100,00
<i>Xanthium albinum</i>	88,89	88,89	100,00	100,00	100,00
Растения	Проценты идентичности (Percent Identity) accD (%)				
	<i>Descurainia sophia</i>	<i>Artemisia annua</i>	<i>Cichorium intybus</i>	-	-
<i>Descurainia sophia</i>	100,00	66,95	65,24	-	-
<i>Artemisia annua</i>	66,94	100	87,23	-	-
<i>Cichorium intybus</i>	65,24	87,23	100,00	-	-

Таблица 5

Проценты идентичности на основании выравнивания концевой участка последовательности белка Photosystem II D1 (psbA)

Растения	Проценты идентичности (Percent Identity) psbA				
	<i>Descurainia sophia</i>	<i>Artemisia annua</i>	<i>Tripleurospermum inodorum</i>	<i>Xanthium albinum</i>	<i>Cichorium intybus</i>
<i>Descurainia sophia</i>	100,00	88,89	88,89	88,89	77,78
<i>Artemisia annua</i>	88,89	100,00	100,00	100,00	88,89
<i>Tripleurospermum inodorum</i>	88,89	100,00	100,00	100,00	88,89
<i>Xanthium albinum</i>	88,89	100,00	100,00	100,00	88,89
<i>Cichorium intybus</i>	77,78	88,89	88,89	88,89	100,00

но, что данные белки растений *Artemisia annua*, *Cichorium intybus*, *Descurainia Sophia*, *Tripleurospermum inodorum*, *Xanthium albinum* действительно сильно различаются, однако это невозможно утверждать без наличия полных последовательностей.

Заключение. Полученные результаты биоинформационного анализа протеома растений Юга России, с использованием разных баз данных, на наличие марганец- и цинк-зависимых белков показали низкую степень изученности, проявляющуюся в отсутствии как самих протеомов, так и аннотации белков. Единственным растением, распространенным на Юге России, которое имело достаточно аннотированный протеом, оказалось *Artemisia annua*. Было обнаружено наличие общего у всех растений Юга России марганец-зависимого белка Photosystem II protein D1 и цинк-зависимого Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta. Множественное выравнивание позволило выявить и описать сильные структурные различия в марганец-зависимом белке Photosystem II protein D1 между *Artemisia lercheana*, *Artemisia annua*, *Cichorium intybus*, *Descurainia sophia*, *Tripleurospermum inodorum* и *Xanthium albinum*, а для цинк-зависимого белка Acetyl-CoA carboxylase carboxyl transferase subunit beta – у *Artemisia lercheana*, *Artemisia annua*, *Cichorium intybus* и *Descurainia sophia*, что связано с множеством замен аминокислот, в том числе консервативных и слабоконсервативных участков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние меди, никеля и кадмия на рост и некоторые физиологические параметры сеянцев *Pinus silvestris* и *Picea abies* (Pinaceae) / И. В. Дроздова, Н. В. Алексеева-Попова, А.И. Беляева, И. Б. Калимова // Растительные ресурсы. – 2014. – Т. 50, № 4. – С. 554–566.

2. Исследование металлзависимых белков доминирующих видов растений и микроорганизмов в аридных агробиоценозах Волгоградской области / В. В. Новочадов, Е. А. Иванцова, П. А. Крылов [и др.] // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3, Экономика. Экология. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 173–182. – DOI: <https://doi.org/10.15688/jvolsu3.2018.4.16>

3. Симонова, О. А. Эффекты избытка марганца (II) на рост и антиоксидантный статус проростков ячменя / О. А. Симонова, М. В. Симонов, Е. В. Товстик // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2020. – Т. 21, № 4. – С. 369–378. – DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.4.369-378>

4. Титов, А. Ф. Тяжелые металлы и растения / А. Ф. Титов, Н. М. Казнина, В. В. Таланова. – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2014. – 194 с.

5. Influence of life form, taxonomy, climate, and soil properties on shoot and root concentrations of 11 elements in herbaceous plants in a temperate desert / M. He, F. A. Dijkstra, K. Zhang [et al.] // Plant and Soil. – 2016. – Vol. 39, № 102. – P. 339–350. – DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-015-2669-0>

6. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation, and resistance mechanisms / R. Millaleo, M. Reyes-Dhaz, A. G. Ivanov [et al.] // J. Soil Sci. Plant Nutr. – 2010. – Vol. 10, № 4. – P. 476–494. – DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>

7. Physiological highlights of manganese toxicity symptoms in soybean plants: Mn toxicity responses / E. F. Santos, J. M. Kondo Santini, A. P. Paixro [et al.] // Plant Physiol. Biochem. – 2017. – Vol. 113. – P. 6–19. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.01.022>

8. Schmidt, S. B. Manganese Deficiency in Plants: The Impact on Photosystem II / S. B. Schmidt, P. E. Jensen, S. Husted // Trends Plant Sci. – 2016. – Vol. 21, № 7. – P. 622–632. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.03.001>

9. Zinc in plants / M. R. Broadley, P. J. White, J. P. Hammond [et al.] // New Phytol. – 2007. – Vol. 173. – P. 677–702.

REFERENCES

1. Drozdova I.V., Alekseeva-Popova N.V., Beljaeva A.I., Kalimova I.B. Vliyanie medi, nikelya i kadmiya na rost i nekotorye fiziologicheskie parametry seyantsev *Pinus silvestris* i *Picea abies* (Pinaceae) [Effect of Copper, Nickel and Cadmium on Growth and Some Physiological Parameters of Seedlings of *Pinus Sylvestris* and *Picea Abies* (pinaceae)]. *Rastitelnye resursy*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 554-566.

2. Novochadov V.V., Ivantsova E.A., Krylov P.A., et al. Issledovanie metallzavisimykh belkov dominiruiushchikh vidov rastenii i mikroorganizmov v aridnykh agrobiotsenozakh Volgogradskoi oblasti [The Study Metal Binding Protein Dominant Types of Plants and Microorganisms in Agrobiocenosis of the Volgograd Region]. *Vestnik*

Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3, Ekonomika. Ekologiya [Science Journal of Volgograd State University. Global Economic System], 2018, vol. 20, no. 4, pp. 173-182. DOI: <https://doi.org/10.15688/jvolsu3.2018.4.16>

3. Simonova O.A., Simonov M.V., Tovstik E.V. Effekty izbytko margantsa (II) na rost i antioksidantnyi status prorostkov yachmenia [The Effect of Manganese (II) excess on Growth and Antioxidant Status of Barley Seedlings]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* [Agricultural Science Euro-North-East], 2020, vol. 21, no. 4, pp. 369-378. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.4.369-378>

4. Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. *Tyazhelye metally i rasteniya* [Heavy Metals and Plants]. Petrozavodsk, Karelian Scientific Center of the RAS, 2014. 194 p.

5. He M., Dijkstra F.A., Zhang K., et al. Influence of Life Form, Taxonomy, Climate, and Soil Properties on Shoot and Root Concentrations of 11 Elements in

Herbaceous Plants in a Temperate Desert. *Plant and Soil*, 2016, vol. 398, no. 102, pp. 339-350. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-015-2669-0>

6. Millaleo R., Reyes-Diaz M., Ivanov A.G., et al. Mn as Essential and Toxic Element for Plants: Transport, Accumulation, and Resistance Mechanisms. *J. Soil Sci. Plant Nutr*, 2010, vol. 10, no. 4, pp. 476-494. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>

7. Santos E.F., Kondo Santini J.M., Paixro A.P., et al. Physiological Highlights of Manganese Toxicity Symptoms in Soybean Plants: Mn Toxicity Responses. *Plant Physiol. Biochem*, 2017, vol. 113, pp. 6-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.01.022>

8. Schmidt S.B., Jensen P.E., Husted S. Manganese Deficiency in Plants: The Impact on Photosystem II. *Trends Plant Sci*, 2016, vol. 21, no. 7, pp. 622-632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.03.001>

9. Broadley M.R., White P.J., Hammond J.P., et al. Zinc in Plants. *New Phytol*, 2007, vol. 173, pp. 677-702.

Information About the Authors

Krylov Pavel Andreevich, Candidate of Sciences (Biology), Associate Professor, Department of Biology and Bioengineering, Volgograd State University, Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation, krylov.pavel@volsu.ru

Abdulova Aliya Alikovna, Student of Department of Biology and Bioengineering, Volgograd State University, Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation. iananash@mail.ru

Permyakov Oleg Valer'evich, graduate student of Department of Biology and Bioengineering, Volgograd State University, Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation. bot@volsu.ru

Novochadov Valery Valer'evich, Doctor of Sciences (Medicine), Professor, Department of Biology and Bioengineering, Volgograd State University, Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation, novochadov.valeriy@volsu.ru

Информация об авторах

Крылов Павел Андреевич, кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии и биоинженерии, Волгоградский государственный университет, просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация, krylov.pavel@volsu.ru

Абдулова Алия Аликовна, студент кафедры биологии и биоинженерии, Волгоградский государственный университет, просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация iananash@mail.ru

Пермяков Олег Валерьевич, аспирант кафедры биологии и биоинженерии, Волгоградский государственный университет, просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация, bot@volsu.ru

Новочадов Валерий Валерьевич, доктор медицинских наук, профессор, кафедры биологии и биоинженерии, Волгоградский государственный университет, просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация, novochadov.valeriy@volsu.ru