

УДК 541.64:541.49

## УВЕЛИЧЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПОЛИФРУКТАНОВ В КЛУБНЯХ ТОПИНАМБУРА ПОД ВЛИЯНИЕМ ХЕЛАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ

З.И. Усанова, Т.И. Смирнова, Н.Н. Иванютина, М.Н. Павлов,  
О.А. Булюкина

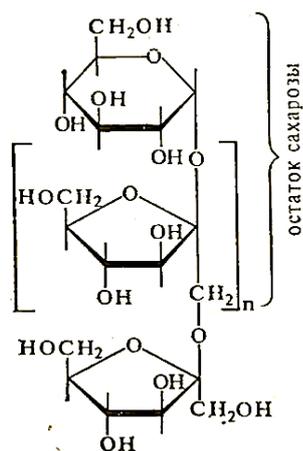
Тверская государственная сельскохозяйственная академия, г. Тверь

Исследована в полевых условиях возможность увеличения содержания инулина в клубнях топинамбура при использовании в качестве микроудобрений хелатных соединений цинка (II), меди (II), кобальта (II), бора (III) и селена (IV) с этилендиаминдиантарной кислотой. Применение всех пяти комплексонатов стимулировало накопление инулина. Прирост по сравнению с контролем в разных вариантах опыта составил от 2,7 до 9,7 %.

**Ключевые слова:** биополимеры, инулин, хелатные комплексы, этилендиаминдиантарная кислота, микроэлементы, комплексонаты.

Полисахариды, выполняющие многообразные функции, в т. ч. роль запасных веществ, являются важнейшими биополимерами растительного мира. Большая часть запасных веществ растений представлена крахмалом – основным компонентом растительных продуктов питания. Некоторые из высших растений накапливают в качестве запасных веществ фруктаны: инулин и олигофруктозу [1].

Инулин – биополимер, макромолекулы которого содержат один остаток  $\alpha$ -D-глюкопиранозы и присоединенные к нему 37 – 44  $\beta$ -D-фруктофуранозных остатка.



В зависимости от вида растения, продуцирующего инулин, и условий его произрастания число фруктофуранозных фрагментов в макромолекулах может быть значительно большим и достигать 80 – 86.

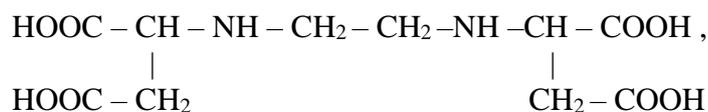
Инулин и олигофруктоза как компоненты продуктов питания, в отличие от крахмала, не расщепляются в верхних отделах пищеварительного тракта, практически в неизменном виде поступают в толстый кишечник, улучшая его моторную функцию, и селективно усваиваются бифидобактериями, обеспечивая их активный рост с одновременным подавлением нежелательной и патогенной микрофлоры, т.е. выполняют функции пребиотиков [2 ;3].

Прямым следствием пребиотического действия инулина и олигофруктозы является укрепление иммунитета, понижение содержания холестерина в крови и уменьшение риска возникновения рака кишечника. Поэтому в настоящее время на мировом рынке предлагается более 2500 функциональных продуктов питания с инулином и олигофруктозой: молочные и мясные продукты, выпечка, кондитерские и другие изделия.

Европейские поставщики инулина (бельгийские и голландские фирмы) производят его из корнеплодов культивируемого ГМ-цикория. В нашей стране инулин как перспективный продукт для диетического питания может быть получен из иного растительного сырья. В количестве, достаточном для промышленного производства, инулин содержится в корне одуванчика, клубнях топинамбура. Содержание инулина в корне одуванчика в 1,5–2 раза выше, чем в клубнях топинамбура [4], но это растение не относится к числу культивируемых, и нет разработанной технологии выделения инулина из этого растения.

Поступающий в продажу в небольших количествах отечественный инулин получают из клубней топинамбура, поэтому актуальной является задача повышения содержания этого полисахарида в клубнях растения доступными и экологически безопасными методами. К числу таких методов относятся предпосадочная обработка клубней и внекорневая обработка вегетирующих растений микроэlementными препаратами, важнейшими из которых для корнеплодных и клубнеплодных растений служат соединения, содержащие цинк, медь, железо, марганец, кобальт, бор. Почвы Тверской области, содержащие достаточное количество соединений железа и марганца, характеризуются дефицитом практически всех остальных микроэlementов. Наиболее доступной для растений формой микроэlementов служат их комплексы с различными хелатирующими лигандами [5]. Эффективными экологически безопасными лигандами являются комплексоны, производные янтарной кислоты (КПЯК) [6], к числу которых относится этилендиаминдиантарная кислота (ЭДДЯК), впервые синтезированная на кафедре химии Калининского

сельскохозяйственного института (ныне Тверская государственная сельскохозяйственная академия).



Если получение и химические свойства комплексонов биометаллов достаточно хорошо известны [5], то как свойства, так и биологическая активность комплексонов микроэлементов-неметаллов (В, Se и др.) на основе КПЯК практически не исследованы, но представляются интересными не только с теоретических, но и с практических позиций.

Функции микроэлементов в растительных организмах многочисленны и разнообразны [7; 8]. Цинк является важнейшим микроэлементом растительного мира. В растениях цинк входит в состав более 30 ферментов, в том числе ферментов, участвующих в процессе фотосинтеза. Цинк играет важную роль в образовании фитогормона ауксина (гормона роста растений). При недостатке цинка замедляется рост растений, повышается проницаемость клеточных мембран. Этот микроэлемент влияет на синтез важнейших биополимеров живых организмов – белков. Поступивший через корневую систему в растение цинк более чем на 50% связывается в комплексы с различными аминокислотами и другими естественными хелатообразователями. В растительном организме около 70% цинка локализуется в хлоропластах. При дефиците цинка замедляется протекание фотосинтеза, возникает так называемая «розеточная болезнь» (укорачивание междоузлий стебля), связанная с недостатком ростовых веществ-ауксинов. Комплексоны цинка на основе других комплексонов: этилендиаминтетрауксусной и нитрилотриуксусной кислот также испытывались в полевых опытах, но обнаружили по сравнению с Zn-ЭДДЯК меньшую эффективность.

Особенностью меди, содержащейся в растениях в количестве 5–20 мкг/г сухой массы, является способность легко переходить из восстановленной формы  $\text{Cu}^+$  в окисленную  $\text{Cu}^{2+}$ , участвуя в окислительно-восстановительных процессах растительного организма. Более 50% меди в растениях находится в хлоропластах. Медь вместе с железом входит в состав терминальной оксидазы электрон-транспортной цепи – цитохромоксидазы. Cu-Zn-супероксиддисмутаза присутствует в хлоропластах, митохондриях, пероксисомах и цитозоле, где участвует в детоксикации супероксидов. Содержащая  $\text{Cu}^+$  аскорбатоксидаза участвует в одной из важнейших реакций процесса фотосинтеза: восстановлении  $\text{O}_2$  до  $\text{H}_2\text{O}$  [8].

К числу микроэлементов, наиболее значимых для растений, относится также кобальт. В природных условиях кобальт встречается в форме катионов  $\text{Co}^{2+}$  и  $\text{Co}^{3+}$ . Кобальта больше других растений содержат бобовые культуры, где он концентрируется в клубеньках. Клубеньковые бактерии и почвенные микроорганизмы используют кобальт для синтеза кобамидных комплексов и витамина  $\text{B}_{12}$ . В такой форме в растениях содержится около 20% кобальта, 50% остается в ионной форме и около 30% представлено неидентифицированными устойчивыми органическими соединениями. Содержащие кобамид коэнзимы участвуют в синтезе ДНК и клеточном делении. Кобальт задействован в ауксиновом обмене и способствует растяжению клеточных оболочек. Поскольку кобальт относится к числу металлов с переменной валентностью, относительно высокое значение окислительно-восстановительного потенциала  $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$  в кислой среде позволяет катионам кобальта участвовать в окислительно-восстановительных процессах. Под действием кобальта повышается активность дегидрогеназ, нитратредуктазы, возрастает содержание хлорофилла, витамина Е и общего гематина. Следовательно, кобальт задействован в работе азотфиксирующей системы, влияет на важнейшие физиологические процессы. По данным литературных источников, кобальт увеличивает урожайность многих сельскохозяйственных культур. Внесение расчётных доз кобальтовых микроудобрений вызывает улучшение использования растением азота и усвоение кальция. Большое значение имеет применение кобальтовых микроудобрений для повышения диетической ценности пищевой продукции растительного происхождения и качества кормов сельскохозяйственных животных.

В большем по сравнению с другими микроэлементами количестве растения нуждаются в боре. Этот неметалл участвует в метаболизме углеводов, нуклеиновых кислот, ростовых веществ, фенолов; входит в состав клеточных стенок растений в форме комплексов с пектинами, влияет на транспорт сахаров, процессы дыхания, функционирования плазмалеммы, растяжения и деления растительных клеток. В последние годы обнаружена необходимость бора не только для растений, но и для человека и животных. Одним из наиболее важных негативных следствий дефицита бора в трофической цепи является остеопороз – патологическое состояние костной системы, всё чаще диагностируемое не только у людей, но и у домашних животных.

Селен относится к числу микроэлементов-неметаллов с уникальными биологическими функциями, важнейшей из которых является антиоксидантная. Селен поддерживает нормальное функционирование не только антиоксидантной, но и детоксицирующей, и иммунной систем организма. В составе живых организмов существует целый ряд селеносодержащих и селенозависимых ферментов: глутатионпероксидаза, глицинредуктаза, формиатдегидрогеназа, деиодиназы и др. Недостаток

селена в продуктах питания является одной из причин более 30 заболеваний человека и сельскохозяйственных животных: сердечно-сосудистых, онкологических, поражений печени, иммунодефицита и др. Метаболизм селена в организме человека тесно связан с метаболизмом другого важнейшего микроэлемента – иода. На фоне недостатка селена оказывается неэффективным лечение заболеваний щитовидной железы препаратами, содержащими иод. В Тверской области, относящейся к числу селенодефицитных регионов, весьма актуальной является задача обогащения сельскохозяйственной продукции селеном. Селен необходим для нормального роста и развития и самим растениям. Одним из важнейших следствий применения селеносодержащих микроудобрений является повышение устойчивости растительных организмов к неблагоприятным условиям окружающей среды: недостатку влаги, перепадам температур и иным стрессовым факторам. Следует отметить, что снижение содержания общего селена в растительной биомассе чревато катастрофическим откликом в животном мире. Дефицит селена в кормах животных и пище человека приводит к снижению резистентности организмов к патогенным бактериям и вирусам, в кровеносной системе уменьшает функциональную активность нейтрофилов, продукцию антител, ослабляет активность Т-киллеров и естественных киллеров. Селенодефицитность растительных рационов питания способствует увеличению токсического действия большинства техногенных ядов, начиная с диоксинов и кончая нитратами.

### Экспериментальная часть

В эксперименте, поставленном в двухфакторном полевом опыте на опытном поле Тверской ГСХА, исследовали возможность увеличения содержания биополимера инулина в клубнях топинамбура путём применения этилендиаминдисукцинатных комплексов микроэлементов в качестве микроудобрений, изучалось два способа применения комплексонатов: 1 – опрыскивание растений топинамбура при высоте растений 50 см растворами, содержащими этилендиаминдисукцинаты микроэлементов в следующих концентрациях: 0,002 М В-ЭДДЯК; 0,015 М Zn-ЭДДЯК и Cu-ЭДДЯК; 0,007 М Со-ЭДДЯК; 0,000126 М Se-ЭДДЯК из расчёта 100 мл/м<sup>2</sup>; 2 – предпосадочная обработка клубней аналогичными растворами из расчёта 100 мл/кг. Клубни контрольных растений и вегетирующие контрольные растения одновременно с опытными обрабатывали дистиллированной водой. Объектом исследований был взят лучший сорт клубневого направления – Скороспелка [9]. Минеральные удобрения в опытных посадках вносились в рекомендованных дозах в расчёте на урожайность 40 т/га клубней. Опыт проводили в четырёхкратной повторности. Урожай учитывали путем сплошной выкопки клубней с учетной площади делянки (14 м<sup>2</sup>) во 2-й декаде октября 2016 г. После уборки урожая в клубнях в них

спектрофотометрическим методом (спектрофотометр СФ-56) определяли содержание инулина (в водном экстракте при  $\lambda=513$  нм) и фруктозы (в водно-спиртовом экстракте при  $\lambda=486$  нм) [10].

### Результаты и их обсуждение

В результате выявлено, что оба способа применения комплексонатов микроэлементов оказывают положительное влияние как на урожайность топинамбура, так и на содержание фруктанов в клубнях (таблица). Так, при некорневой обработке растений все комплексонаты, кроме Cu-ЭДДЯК, обеспечили получение достоверных прибавок урожая от 5,9 до 24,3 %. Наибольшая прибавка урожая клубней – 9,54 т/га, или 24,3 % – получена от использования В-ЭДДЯК.

Предпосадочная обработка клубней хелатными соединениями в большей мере увеличила урожай при применении Со-ЭДДЯК – на 10,06 т/га, или 27,3 %.

#### Влияние этилендиаминдисуцинатных комплексов микроэлементов на содержание фруктанов и урожайность клубней топинамбура

№ п/п	Способ обработки	Воздействующее вещество раствора для обработки	Фруктаны, ω (%)			Урожайность		Выход инулина	
			инулин	фруктоза	общее содержание	т/га	%	т/га	%
1		Контроль, б.о.	11,0	1,9	12,9	39,28	100,0	4,32	100,0
2		Zn-ЭДДЯК	14,7	1,9	16,6	45,26	115,2	6,65	154,0
3		Cu-ЭДДЯК	14,6	1,9	16,5	38,89	99,0	5,68	131,5
4		Со-ЭДДЯК	13,7	4,6	18,3	41,60	105,9	5,70	131,9
5		В-ЭДДЯК	20,7	3,8	24,5	48,82	124,3	10,11	233,8
6		Se-ЭДДЯК	19,9	3,0	22,9	46,46	118,3	9,25	214,1
7		Контроль, б.о.	10,9	3,2	14,1	36,90	100,0	4,02	100,0
8		Zn-ЭДДЯК	15,1	2,1	17,1	42,18	114,3	6,37	158,5
9		Cu-ЭДДЯК	18,8	1,8	20,6	43,67	118,3	8,21	204,2
10		Со-ЭДДЯК	16,3	1,9	18,2	46,96	127,3	7,65	190,3
11		В-ЭДДЯК	15,8	1,8	17,6	39,58	107,3	6,25	155,5
12		Se-ЭДДЯК	20,1	1,9	20,0	40,60	110,0	8,16	203,0

Примечание: б.о. – без обработки, НСР<sub>05</sub>, т/га: по способу обработки – 3,33, по виду комплексоната – 4,71

Увеличение урожайности тесно связано с повышением содержания инулина в клубнях. Так, наибольшее количество накопленного инулина при внекорневой обработке обнаружено в клубнях растений, подвергшихся воздействию селено- и

боросодержащих комплексов. Увеличение в сравнении с контролем составило 8,8 и 9,7 % соответственно. При предпосадочной обработке клубней наибольшее увеличение содержания инулина наблюдалось в вариантах с Cu-ЭДДЯК и Se-ЭДДЯК – 7,9 и 9,2 %.

Применение экологически чистых комплексонов в технологии возделывания топинамбура позволит решить проблему увеличения производства инулина в клубнях в сочетании с ростом урожайности. При воздействии хелатов существенно увеличивается выход инулина с гектара посадок топинамбура. Так, при внекорневой обработке растений от применения В-ЭДДЯК выход инулина в сравнении с контролем возрос на 133,8 % (на 5,79 т/га), а от Se-ЭДДЯК – на 103,0 %, Cu-ЭДДЯК – на 104,2 %, соответственно на 3,63; 4,14 и 4,19 т/га.

Комплексоны двух неметаллов – В и Se – целесообразно использовать для опрыскивания вегетирующих растений, а комплексоны трех биометаллов – Cu, Co, Zn – для предпосадочной обработки клубней.

Применение хелатных соединений микроэлементов является эффективным средством повышения содержания в клубнях топинамбура важнейшего натурального биополимера – инулина.

Наибольшее количество инулина в клубнях накапливается при опрыскивании вегетирующих растений растворами комплексонов Se-ЭДДЯК (19,9 %) и В-ЭДДЯК (20,7 %), а также при предпосадочной обработке клубней растворами Cu-ЭДДЯК (18,8 %) и Se-ЭДДЯК (20,1 %). Вместе с одновременным повышением урожайности это позволяет получить с гектара посадок топинамбура сорта Скороспелка до 8,21 – 10,11 т инулина и увеличить его выход в сравнении с контролем на 104,2 – 113,8 %.

### Список литературы

1. Кочетков Н.К., Бочков А.Ф. и др. Химия углеводов. Фруктаны. М.: Химия, 1967. 535 с.
2. Перковец М.В. // Пищевая промышленность. 2007. Т. 6, № 5. С. 22.
3. Pool-Zobel V.L. // British J. Nutrition. 2005. V. 93, № 1. P.73.
4. Халяпина Я.М., Бутавин Н.Ю., Смирнова Т.И. // Физико-химия полимеров. Тверь, 2010. Вып. 16. С. 192.
5. Дятлова Н.М., Тёмкина В.Я., Попов К.И. Комплексоны и комплексоны металлов. М: Химия, 1988. С. 439–506.
6. Смирнова Т.И., Никольский В.М., Кудряшова Л.В. и др. // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. Т. 57, № 1. С. 61.
7. Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И. Агрохимия. М.: Колос, 2002. С. 107 - 1196.

8. Физиология растений / под ред. И.П. Ермакова. М.: Академия, 2007. С. 411 – 415.
9. Усанова З.И., Павлов М.Н. Влияние фона минерального питания и фотопериодизма на формирование урожайности сортов топинамбура и продуктивность агроценозов в условиях Верхневолжья // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30, № 5. С. 64–68.
10. Коренман И.М. Фотометрический анализ. Методы определения органических соединений. М.: Химия, 1975. С. 205.

## THE INCREASE OF POLYFRUCTAN AMOUNT IN THE TUBERS OF JERUSALEM ARTICHOKE UNDER THE INFLUENCE OF CHELATE COMPLEXES OF TRACE ELEMENTS

Z.I. Usanova, T.I. Smirnova, N.N. Ivanyutina, M.N. Pavlov,  
O.A. Bulyukina

Tver state agricultural Academy, Tver

The possibility of increasing the content of inulin in tubers of Jerusalem artichoke were studied in field conditions for use as micronutrients chelated compounds of zinc(II), copper(II), cobalt(II), boron(III) and selenium(IV) with ethylenediaminedisuccinic acid. The use of all five kompleksonates stimulated the accumulation of inulin. The increase compared to control in different options of experience ranged from 2.7 to 9.7 %.

**Keywords:** *biopolymer, inulin, chelated complexes, ethylenediaminedisuccinic acid, trace substances, complexonates.*

*Об авторах:*

УСАНОВА Зоя Ивановна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры технологии производства, переработки и хранения продукции растениеводства Тверской государственной сельскохозяйственной академии, e-mail: rastenievodstvo@mail.ru

СМИРНОВА Татьяна Ивановна – кандидат химических наук, доцент кафедры агрохимии и земледелия Тверской государственной сельскохозяйственной академии, e-mail: tatsmi2013@mail.ru

ИВАНЮТИНА Наталья Николаевна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры технологии производства, переработки и хранения продукции растениеводства Тверской государственной сельскохозяйственной академии, e-mail: ivanutina.natalya@yandex.ru

ПАВЛОВ Максим Николаевич – аспирант кафедры технологии производства, переработки и хранения продукции растениеводства Тверской государственной сельскохозяйственной академии, e-mail: mixrobott@gmail.com

БУЛЮКИНА Ольга Александровна – аспирант кафедры технологии производства, переработки и хранения продукции растениеводства Тверской государственной сельскохозяйственной академии, e-mail: rastenievodstvo@mail.ru