

На правах рукописи



**Сухоцкая
Валентина Владимировна**

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПИТАНИЯ ЦИНКОМ И МЕДЬЮ
ЭХИНАЦЕИ ПУРПУРНОЙ (*ECHINACEA PURPUREA* L.)
НА ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЁМНОЙ ПОЧВЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

06.01.04 – Агрохимия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
сельскохозяйственных наук

Омск - 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина» на кафедре агрохимии и почвоведения.

Научный руководитель **Ермохин Юрий Иванович**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ

Официальные оппоненты: **Конарбаева Галина Акмулудиновна** - доктор биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория биогеохимии почв ФГБУН «Институт почвоведения и агрохимии» Сибирского отделения РАН, ведущий научный сотрудник

Ступаков Алексей Григорьевич - доктор сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра земледелия, агрохимии, землеустройства, экологии и ландшафтной архитектуры ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина», профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого»

Защита состоится «19» сентября 2022 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 220.010.07 на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, 1; тел./факс +7(473)253-86-51, e-mail: stekolnikova-nv@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» и на сайте www.ds.vsau.ru, с авторефератом на сайте ВАК Министерства образования и науки РФ www.vak.minobrnauki.gov.ru и ВГАУ www.ds.vsau.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2022 года

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные и скрепленные гербовой печатью организации, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Учёный секретарь диссертационного совета



Стекольников Н.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На земле произрастают тысячи разнообразных растений. Среди них – большое количество лекарственных. Применение лекарственных и эфиромасличных культур весьма обширно и разнообразно, сырье и продукция используется как в традиционной, так и в народной медицине, парфюмерии и косметологии, в ветеринарной практике, пищевой промышленности, для ландшафтного дизайна и др. (Махлюк В.П., 1993).

В последнее время внимание исследователей стал привлекать микроэлементный состав пищевых и лекарственных растений, проводятся работы по искусственному обогащению микроэлементами растений, чтобы ликвидировать дисбаланс тех или иных микроэлементов в организме человека (Бабаева Е.Ю., 2003; Синдирева А.В., 2001, 2012; Тищенко Н.Н., 2015).

Большинство чернозёмных почв Омской области по данным агрохимического мониторинга характеризуется недостаточным содержанием подвижного цинка и меди (Красницкий В.М., 2002). Острый дефицит цинка и меди в почвах отражается на продуктивности растений, а использование микроэлементов способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур, повышению качества продукции оказывает положительное воздействие на животных и др. (Синдирева А.В., 2012).

В связи с этим, наряду с вопросами повышения продуктивности лекарственных растений, целесообразно изучение содержания и прогнозирования биологически активных веществ и микроэлементов в лекарственном сырье на основе почвенной и растительной диагностики питания растений и эффективности применения удобрений.

Степень разработанности темы.

Проблемам повышения продуктивности эхинацеи пурпурной за счет использования макро- и микроудобрений посвящены работы В.С. Бойко (1998), Е.Ю. Бабаевой и др. (1998, 2003, 2011), Т.Н. Беляевой и др. (2003, 2014), Е.О. Никольской (2008), В.И. Антипова (2009), Д.А. Костылева и др. (2009), Л.Н. Шашко (2009), Л.Ю. Гончаровой (2012), А.Г. Губанева и др. (2013 г.), В.Б. Загуменникова (2014), и др. Результаты исследований, показывают высокую эффективность применения удобрений под изучаемую культуру. При этом не изучалась эффективность применения цинковых и медных удобрений с целью повышения урожайности и качества лекарственного сырья эхинацеи пурпурной на лугово-черноземной почве Западной Сибири.

Цель исследований – изучить эффективность применения цинковых и медных удобрений при диагностировании и оптимизации минерального питания эхинацеи пурпурной на лугово-черноземной почве в условиях южной лесостепи Западной Сибири.

Задачи исследований:

– выявить действие и последствие расчетных доз микроэлементов (цинка, меди) на урожайность и показатели качества эхинацеи пурпурной на лугово-черноземной почве;

– изучить влияние цинковых и медных удобрений на химический состав лугово-черноземной почвы и растений эхинацеи пурпурной;

– определить нормативные количественные характеристики интенсивности действия единицы внесенных в почву микроэлементов на содержание основных макро- и микроэлементов в почве, растениях и показатели качества лекарственного сырья;

– определить нормативные количественные показатели выноса основных элементов питания урожаем, коэффициенты использования питательных веществ из почвы (КИП), показатели эффективности микроудобрений (ПЭУ);

– дать оценку биоэнергетической и экономической эффективности применяемых микроудобрений.

Научная новизна определяется отсутствием на сегодняшний день конкретных рекомендаций по эффективности применения макро- и микроэлементов под эхинацею пурпурную с целью получения высоких урожаев и качества. Впервые, используя принципы единого комплексного метода почвенно-растительной оперативной диагностики («ПРОД»), для условий южной лесостепи Западной Сибири были установлены нормативные количественные характеристики, отражающие взаимосвязь формирования величины урожая эхинацеи пурпурной, химического состава почвы, растений, качества лекарственного сырья с дозами микроудобрений, вносимыми в почву. Определены оптимальные уровни содержания и соотношения цинка и меди в почве и растениях, нормативные агрохимические и физиологические показатели почвы и растений. Установленные параметры позволяют диагностировать и оптимизировать питание растений эхинацеи пурпурной в процессе роста и развития и управлять эффективностью применения микроэлементов (Zn, Cu).

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в разработке научно обоснованной системы диагностики и оптимизации минерального питания цинком и меди эхинацеи пурпурной на лугово-черноземной почве в условиях юга Западной Сибири, обеспечивающей повышение урожайности и улучшение качества лекарственного сырья при высоких показателях экономической и биоэнергетической эффективности.

В ходе работы были установлены оптимальные дозы цинковых и медных удобрений для повышения урожайности эхинацеи пурпурной, определено качество лекарственного сырья, оптимальное содержание микроэлементов в лугово-черноземной почве и растениях, нормативные агрохимические параметры. Материалы работы могут быть использованы при промышленном выращивании эхинацеи пурпурной в условиях юга Западной Сибири.

Практическая значимость и реализация результатов исследований.

Разработаны и научно обоснованы результаты по применению цинка и меди под эхинацею пурпурную на лугово-черноземной почве в зональных условиях Западной Сибири.

Выявленные закономерности в системе «микроудобрения (Zn, Cu) – почва – растение» позволяют оптимизировать поступление цинка и меди в растения,

создавать уравновешенное питание и тем самым управлять процессом формирования величины и качества урожая эхинацеи пурпурной. Разработка гибкой системы удобрения эхинацеи, позволяет повысить окупаемость микроудобрений урожаем и снизить затраты на удобрения.

Результаты исследований являются научной основой для создания комплексной зональной системы возделывания лекарственных культур и повышении их продуктивности с использованием микроудобрений.

Методология и методы исследований. В основу методологического подхода при проведении исследований положены принципы единого метода почвенно-растительной оперативной диагностики («ПРОД») минерального питания, эффективности удобрений и качества урожая, разработанные Ю.И. Ермохиным (Ермохин Ю.И., 1968, 1983, 1991, 1995, 2005, 2020).

Основные положения, выносимые на защиту:

– установленные оптимальные уровни содержания и соотношения макро- и микроэлементов (цинка и меди) в лугово-черноземной почве и растениях позволяют диагностировать и оптимизировать минеральное питание эхинацеи пурпурной в период её роста и развития;

– разработанная система «ПРОД» эхинацеи пурпурной позволяет устанавливать оптимальные дозы микроудобрений и с использованием управлять урожайностью и качеством лекарственного сырья.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы были представлены докладами и обсуждены на: I Региональной (заочной) научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся «Проблемы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов» (Омск, 2017); Международной научно-практической конференции «Всемирный день охраны окружающей среды «Экологические чтения- 2017» (Омск, 2017); Международной научно-практической конференции «Научные инновации – аграрному производству» (Омск, 2018); II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Современные научно-практические решения в АПК» (Тюмень, 2018); Национальной научно-практической конференции «Приоритетные направления научно-технологического развития агропромышленного комплекса России» (Рязань, 2018); Международной научно-практической конференции «Экологические чтения» (Омск, 2018); X, XI Национальной научно-практической конференции «Экологические чтения» (Омск, 2019, 2020);

Публикации. По теме исследования опубликовано 21 работа, отражающая основные положения исследования, среди которых – 8 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК Российской Федерации, 2 статьи в журнале из базы Scopus.

Личный вклад. В основу данной работы положены собственные исследования автора. Доля личного участия автора в сборе и обобщении результатов исследований является определяющей.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 225 страницах. Состоит из введения, семи глав, заключения, предложений

производству, приложений. Содержит 63 таблицы, 263 уравнения, иллюстрирована 34 рисунками, содержит 25 приложений. Библиографический список состоит из 322 наименования, в том числе 32 - зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1 ИСТОРИЯ И СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА

В данной главе проведен глубокий анализ научной литературы по многим вопросам: 1.1 Эхинацея пурпурная: биологические особенности, значение, распространение. 1.2 Агрохимическая и физиологическая роль цинка и меди. 1.3 Вопросы агротехники, питания и качества эхинацеи пурпурной. 1.4 Интеграционная система «ПРОД» в оценке действия микроэлементов в системе «удобрение-почва-растение».

2 ОБЪЕКТЫ, УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объекты исследований. Эхинацея пурпурная (*Echinacea purpurea* (L.) Moench.) сорта *Знахарь*, почва лугово-черноземная, макро- и микроудобрения (ацетаты цинка и меди).

Почва лугово-черноземная маломощная малогумусовая среднесуглинистая. Агрохимические характеристики почвы пахотного слоя полевого участка характеризовались следующими параметрами: содержание нитратного азота - низкое; подвижного фосфора и обменного калия - высокое. Содержание цинка и меди в почве характеризовалось как низкое.

Используемые формы минеральных удобрений: аммиачная селитра (N – 34,5 %), ацетат цинка ((CH₃COO)₂Zn – 29,7 %), ацетат меди ((CH₃COO)₂Cu – 32 %).

Метеорологические условия в годы проведения исследований. По количеству осадков за май-сентябрь и сумме положительных температур этот период исследований можно охарактеризовать следующим образом: жаркий и умеренно влажный – 2016 г., жаркий и сухой – 2017 г., тёплый и влажный – 2018 г.

Методика проведения полевых и лабораторных исследований.

Полевой опыт был заложен во второй декаде мая 2016 г., на опытном поле Омского ГАУ с расчётными дозами цинка и меди по схеме:

1. Без удобрений (абсолютный контроль);
2. Фон (N₁₂₅);
3. Фон + Zn_{10,7} (0,25 ПДК);
4. Фон + Zn_{21,4} (0,5 ПДК);
5. Фон + Zn_{32,4} (0,75 ПДК);
6. Фон + Zn_{42,8} (ПДК);

7. Фон + Cu_{2,3} (0,25 ПДК);
8. Фон + Cu_{4,7} (0,5 ПДК);
9. Фон + Cu_{7,0} (0,75 ПДК);
10. Фон + Cu_{9,4} (ПДК).

Размещение вариантов в несколько ярусов со смещением. Общая площадь и учётная площадь делянки 10 м². Опыт был заложен в четырехкратной повторности. Предшественник – чистый пар, агротехника – общепринятая для зоны.

Физиологические и биометрические наблюдения за ростом и развитием растений, отбор растительных и почвенных образцов были приурочены к фазам развития растений эхинацеи пурпурной (отрастание, бутонизация, цветение). Уборка урожая зелёной массы и соцветий *Echinacea purpurea* проводили вручную в фазе массового цветения.

Перед посадкой, в период отрастания и уборки проводили отбор почвенных образцов для определения нитратного азота, подвижного фосфора, обменного калия и продуктивной влаги. В почвенных образцах содержание N-NO₃ определяли с дисульфифеноловой кислотой по Грандваль-Ляжу, количество подвижного фосфора по Де-Ниже, обменного калия методом пламенной фотометрии из одной вытяжки (2% CH₃COOH).

В растениях по фазам роста и развития определяли содержание нитратного азота, неорганического фосфора и свободного калия с помощью 2%-ной уксуснокислой вытяжки.

Содержание цинка и меди в почве и растениях определяли атомно-абсорбционным методом - ГОСТ 30178-96.

Из показателей качества эхинацеи пурпурной определяли: общую зольность по методике Государственной фармакопеи, витамин С по Мури, дубильные вещества и экстрактивные вещества – ГОСТ 24027.2-80, каротин – ГОСТ 13496.17-95, цикориевую кислоту – ФС.2.5.0055.15, кадмий и свинец – ГОСТ 30178-96, ртуть – ГОСТ 34427-2018 и мышьяк – МУ 31-05/04.

Обработку полученных опытных данных подвергали методами дисперсионного и корреляционно-регрессионного анализов. Биоэнергетическую оценку эффективности применения минеральных удобрений на урожайность эхинацеи пурпурной проводили по методике Ю.И. Ермохина, А.Ф. Неклюдова.

3 ДИАГНОСТИКА ПОТРЕБНОСТИ ЭХИНАЦЕИ ПУРПУРНОЙ В УДОБРЕНИЯХ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО ОПЫТА

3.1 Влияние цинковых и медных удобрений на урожайность эхинацеи пурпурной

Действие и последствие цинковых удобрений на биосинтез сухого вещества эхинацеи пурпурной

Исследования показали, что действие Zn на урожайность эхинацеи пурпурной зависело от вносимой дозы элемента удобрений, метеорологических условий года (Таблица 1).

Таблица 1 – Влияние цинковых удобрений на урожайность абсолютно сухого вещества растений эхинацеи пурпурной (*Echinacea purpurea* L.), полевые опыты (2016-2018 гг.)

| Вариант опыта | Урожайность сухого вещества, т/га | | | Средняя урожайность, т/га/прибавка к фону, % | Общая урожайность, т/га /прибавка к фону, % | Урожайность корневищ (2018 г.), т/га /прибавка, % | Урожайность товарной части (трава+к орневища), т/га /% | Окупаемость 1 кг Zn урожаем, кг (средняя/общая) |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|--|---|---|--|---|
| | 2016 | 2017 | 2018 | | | | | |
| Контроль | 1,5 | 10,1 | 11,0 | 7,5/- | 22,6/- | 7,9/- | 30,5/- | - |
| Фон (N ₁₂₅) | 1,4 | 11,2 | 12,1 | 8,2/- | 24,7/- | 8,4/- | 33,1/- | - |
| Фон+0,25ПДКZn (10,7 кг д.в./га) | 1,8 | 11,5 | 13,0 | 8,8/7,3 | 26,3/6,5 | 8,8/4,8 | 35,1/6,0 | 28,0/186,9 |
| Фон+0,5ПДК Zn (21,4 кг д.в./га) | 1,9 | 12,5 | 15,4 | 9,9/20,7 | 29,8/20,6 | 10,5/25 | 40,3/21,8 | 79,4/336,4 |
| Фон+0,75ПДКZn (32,4 кг д.в./га) | 1,8 | 9,2 | 12,1 | 7,7/-6,1 | 23,1/-6,5 | 8,7/3,6 | 31,8/-3,9 | - |
| Фон+ПДК Zn (42,8 кг д.в./га) | 1,5 | 9,9 | 12,3 | 7,9/-3,6 | 23,7/-4,0 | 8,5/1,2 | 32,2/-3,0 | - |
| НСР ₀₅ | 0,11 | 0,39 | 0,32 | | | 0,29 | | |

В зависимости от года произрастания и доз внесения Zn в почву, формирование биомассы сухого вещества характеризуются следующими уравнениями (1-4):
 Первый год жизни (2016 г.) $Y_1 = 0,023Zn + 1,45; r = 0,94$ (1)

Второй год жизни (2017 г.) $Y_2 = 0,061Zn + 11,08; r = 0,95$ (2)

Третий год жизни (2018 г.) $Y_3 = 0,154Zn + 11,85; r = 0,97$ (3)

2016-2018 гг. $Y_4 = 0,079Zn + 8,12; r = 0,98$ (4)

Из уравнений следует, что каждый килограмм однократно внесенного цинксодержащего удобрения увеличивает урожайность сухого вещества эхинацеи пурпурной в зависимости от года произрастания на 0,023 (Y_1), 0,061 т/га (Y_2), и на 0,154 т/га (Y_3). В среднем, каждый кг внесённого цинка в лугово-чернозёмную почву (от низкой до оптимальной дозы) увеличивает урожайность сухого вещества эхинацеи пурпурной на 0,079 т/га (Y_4).

Два года последствия влияния Zn удобрений показали, формирование урожайности сухого вещества соцветий происходит тождественно общей урожайности. Применение расчётных доз цинка от низких до оптимальных (10,7...21,4 кг. д.в./га) наблюдается тесная корреляционная связь между дозами цинка и урожайностью соцветий ($r=0,96-0,99$), которая характеризуется уравнениями регрессии (5-7).

Второй год жизни (2017 г.) $Y_5 = 0,065 Zn + 1,43; r = 0,99$ (5)

Третий год жизни (2018 г.) $Y_6 = 0,112 Zn + 2,6; r = 0,96$ (6)

В среднем (2017-2018 гг.) $Y_7 = 0,089 Zn + 2,02. r = 0,98$ (7)

Уравнения регрессии свидетельствуют о том, что каждый кг внесенного цинка в почву увеличивает урожайность соцветий сухого вещества эхинацеи в среднем на 0,089 т/га (уравнение 7).

Действие и последствие медных удобрений на биосинтез урожая сухого вещества.

Исследования показали, что действие Cu на азотном фоне на урожайность эхинацеи пурпурной зависело также от доз меди и года жизни растений (Таблица 2).

Таблица 2 – Влияние медных удобрений на урожайность абсолютно сухого вещества растений эхинацеи пурпурной (*Echinacea purpurea* L.), полевые опыты (2016-2018 гг.)

| Вариант опыта | Урожайность сухого вещества, т/га | | | Средняя урожайность, т/га/прибавка к фону, % | Общая урожайность, т/га/прибавка к фону, % | Урожайность корневищ, (2018 г.), т/га / прибавка, % | Урожайность товарной части (трава+ корневища), т/га / % | Окупаемость 1 кг Cu урожаем, кг (средняя/общая) |
|--------------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|--|--|---|---|---|
| | 2016 | 2017 | 2018 | | | | | |
| Контроль | 1,5 | 10,1 | 11,0 | 7,5/- | 22,6/- | 7,9/- | 30,5/- | - |
| Фон (N125) | 1,4 | 11,2 | 12,1 | 8,2/- | 24,7/- | 8,4/- | 33,1/- | - |
| Фон+0,25ПДКСu (2,3 кг д.в./га) | 1,6 | 12,2 | 15,2 | 9,7/18,3 | 29,0/17,4 | 10,8/28,6 | 39,8/20,2 | 652/2913 |
| Фон+0,5ПДКСu (4,7 кг д.в./га) | 1,8 | 14,7 | 16,9 | 11,1/35,4 | 33,4/35,2 | 11,8/40,5 | 45,2/36,6 | 617/2630 |
| Фон+0,75ПДКСu (7,0 кг д.в./га) | 2,1 | 17,3 | 18,6 | 12,7/54,9 | 38,0/53,8 | 12,7/51,2 | 50,7/53,2 | 642/2514 |
| Фон + ПДКСu (9,4 кг д.в./га) | 2,1 | 18,5 | 19,0 | 13,2/61,0 | 39,6/60,3 | 13,1/56,0 | 52,7/59,2 | 532/2085 |
| НСР ₀₅ | 0,11 | 0,39 | 0,32 | | | 0,29 | | |

Математическая обработка данных действия и последствия медных удобрений на урожайность сухого вещества эхинацеи пурпурной, показала, высокую корреляционную связь в системе «доза меди (кг/га) – урожайность биомассы (т/га)» – (уравнения 8-11):

$$\text{Первый год жизни (2016 г.) } Y_8 = 0,081Cu + 1,42; r = 0,97 \quad (8)$$

$$\text{Второй год жизни (2017 г.) } Y_9 = 0,84Cu + 10,86; r = 0,99 \quad (9)$$

$$\text{Третий год жизни (2018 г.) } Y_{10} = 0,73Cu + 12,94; r = 0,96 \quad (10)$$

$$\text{2016-2018 гг. } Y_{11} = 0,53 Cu + 8,41 \quad r = 0,99 \quad (11)$$

Полученные уравнения (8-11) показывают, что каждый килограмм внесённого медного удобрения в почву под эхинацею пурпурную увеличивает урожайность на 0,081 т/га (Y_8) в первый год действия и последующие два года последствия на 0,84 – 0,73 т/га (уравнение 9-10). Уравнение 11 свидетельствует о том, что каждый внесённый кг медного удобрения в пределах оптимальной дозы (9,4 кг д.в./га) повышает урожайность сухого вещества наземной массы эхинацеи пурпурной 0,53 т/га.

Внесение в почву расчётных доз медных удобрений от низких до оптимальных (2,3...9,4 кг. д.в./га) показывает наличие зависимости действия меди на урожайность соцветий эхинацеи, уравнение регрессии 12-14:

$$\text{Второй год жизни (2017 г.) } Y_{12} = 0,27 \text{ Cu} + 1,44; \quad r = 0,99 \quad (12)$$

$$\text{Третий год жизни (2018 г.) } Y_{13} = 0,42 \text{ Cu} + 2,49; \quad r = 0,98 \quad (13)$$

$$\text{В среднем (2017-2018 гг.) } Y_{14} = 0,35 \text{ Cu} + 1,96. \quad r = 0,99 \quad (14)$$

Уравнения 12-14 прямой зависимости свидетельствуют о том, что 1 кг Cu, внесенной до оптимальной дозы (9,4 кг. д.в./га) повышает урожайность соцветий сухого вещества эхинацеи (Y_{12} - Y_{14}) до 0,27 и 0,42 т/га во второй и третий годы жизни растений. В среднем за 2017-2018 гг. 1 кг Cu увеличивает урожайность сухого вещества соцветий на 0,35 т/га.

Данные трёхлетних полевых опытов с цинком и медью, внесённых в лугово-чернозёмную почву под эхинацею пурпурную от низких до оптимальных доз позволили получить ответную реакцию растений при формировании общей биомассы (наземной и корневищ) лекарственной культуры.

$$Y_{Zn} = 32,57 + 0,34Zn; \quad r = 0,97 \quad (15)$$

$$Y_{Cu} = 34,33 + 2,13Cu; \quad r = 0,98 \quad (16)$$

Математическая обработка данных полевых опытов с микроэлементами показала, что каждый килограмм разового внесенного цинкового и медного удобрения в пределах оптимальных доз увеличивает биомассу наземной части и корневищ эхинацеи пурпурной за год действия и два года последствия на 0,34 и 2,13 т/га сухого вещества (уравнения 15-16).

При получении средних данных урожаев надземной биомассы (ПУ) эхинацеи пурпурной за три года исследований (Таблицы 1 и 2) рассчитываем дозы цинка и меди по формулам 17-18:

$$D_{Zn} = (ПУ_{т/га} - ФУ_{т/га}) / 0,079, \text{ кг/га или } D_{Zn} = (9,9 - 8,2) / 0,079 = 21,5 \text{ кг/га} \quad (17)$$

$$D_{Cu} = (ПУ_{т/га} - ФУ_{т/га}) / 0,53, \text{ кг/га или } D_{Cu} = (13,2 - 8,2) / 0,53 = 9,4 \text{ кг/га} \quad (18)$$

где ПУ – планируемая урожайность, т/га;

ФУ – фактическая урожайность (фон) т/га;

«b» - коэффициент интенсивности действия цинковых ($b_{Zn}=0,079$) – уравнение 4, и медных ($b_{Cu}=0,53$) – уравнение 11, удобрений (кг) на формирование общей урожайности эхинацеи пурпурной (т/га).

Дозы вносимых удобрений (Д) под сельскохозяйственные культуры зависят от ряда факторов и, в первую очередь, являются функцией содержания доступных элементов питания в почве: $D=f(X_{П})$.

Математически это можно представить следующей формулой по Ю.И. Ермохину, 1995:

$$D_o \cdot X_o = D_n \cdot X_n \quad (19) \quad \text{Отсюда: } D_n = \frac{D_o \cdot X_o}{X_n} \quad (20)$$

где X_o – уровни макро- и микроэлементов, мг/кг в почве перед посадкой растений; D_o – оптимальные дозы элементов питания, кг д.в./га; D_n – прогнозируемые дозы удобрений, кг д.в./га; X_n – концентрация элементов питания почвы конкретного полевого участка, мг/кг.

Данный метод расчета позволяет уточнять дозы удобрений в зависимости от химического состава почвы, повысить их эффективность под эхинацею пурпурную и получить высокие урожаи хорошего качества. Отсюда расчётные дозы цинка и меди (кг/га) предлагаются по формуле 21-22:

$$D_{Zn} = \frac{21,4 \cdot 1,15}{Zn, \frac{мг}{кг}} = \frac{26,6}{Zn, \frac{мг}{кг}}, \quad (21) \quad D_{Cu} = \frac{9,4 \cdot 0,1}{Cu, \frac{мг}{кг}} = \frac{0,94}{Cu, \frac{мг}{кг}} \quad (22)$$

Предложенные нами формулы расчётных доз цинка и меди для лугово-черноземной почвы, под эхинацею пурпурную, позволяют использовать первый принцип «ИСПРОД» - экспресс метод почвенной диагностики – оценки способности почв удовлетворить потребность растений в питательных веществах в конкретных зональных условиях

4 ПОЧВЕННАЯ ДИАГНОСТИКА МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ ЭХИНАЦЕИ ПУРПУРНОЙ

4.1 Содержание цинка и меди в лугово-черноземной почве при внесении микроудобрений

Для диагностики и оптимизации питания растений цинком и медью необходимо иметь количественные данные содержания их в почве. Интерес представляет изучение распределения Zn и Cu не только в плодородном слое (0-30 см), но и их распределение по профилю лугово-черноземной почвы опытного участка (слой 0-100).

В исследованиях установлено, что концентрация подвижных форм микроэлементов по глубине изменяется. Наименьшее количество микроэлементов – в пахотном горизонте (0-20 см). С увеличением глубины слоя почвы наблюдается увеличение концентрации цинка – до 1,52 мг/кг (60-80 см) и меди – до 0,18 мг /кг (80-100 см).

Содержание подвижных форм цинка в почве при внесении цинковых удобрений

В зависимости от года действия и последствия внесения Zn в почву на содержание подвижного цинка ($r = 0,97-0,98$) получены уравнения связи 23-26 (Таблица 3) с различными коэффициентами (« b_{Zn} », мг/кг) интенсивности действия на почву (2016 г. - « b » – 0,211, 2017 г. - « b » – 0,374, 2018 г. - « b » – 0,140 мг/кг почвы. В среднем за годы исследований он составил 0,242 мг/кг, что соответствует оценки 1 мг Zn/кг почвы -4,1 кг цинковых удобрений. Данный норматив служит основой при оптимизации цинкового питания и расчетах доз удобрений.

Оптимальный уровень содержания Zn – 7,4 мг/почвы, при оптимальной дозе $Zn_{21,4}$ кг/га (Таблица 5).

Таблица 3 – Математические модели содержания цинка в почве (мг/кг) в зависимости от доз применяемого цинка (X, кг д.в./га), полевые опыты 2016-2018 гг.

| Год исследований | Уравнение регрессии | «b», мг/кг | Коэффициент корреляции | |
|------------------|----------------------|------------|------------------------|------|
| 2016 г. | $Y_{23}=0,211x+2,32$ | 0,211 | $r=0,98$ | (23) |
| 2017 г. | $Y_{24}=0,374x+2,82$ | 0,374 | $r=0,97$ | (24) |
| 2018 г. | $Y_{25}=0,140x+1,90$ | 0,140 | $r=0,97$ | (25) |
| 2016-2018 гг. | $Y_{26}=0,242x+2,35$ | 0,242 | $r=0,98$ | (26) |

Содержание подвижных форм меди в почве при внесении медных удобрений

При введении меди в почву и идентификации ответной реакции почвы на изменения содержания подвижной меди позволяет установить математические модели взаимосвязи в системе «удобрения-почва» с установлением коэффициентов интенсивности действия медных удобрений (b_{Cu} , мг/кг) на лугово-черноземной почве (Таблица 4).

Таблица 4 – Математические модели содержания меди в почве (мг/кг) в зависимости от доз применяемой меди (X, кг д.в./га), полевые опыты 2016-2018 гг.

| Год исследований | Уравнение регрессии | «b», мг/кг | Коэффициент корреляции | |
|------------------|-----------------------|------------|------------------------|------|
| 2016 год | $Y_{27}=0,008x+0,09$ | 0,008 | $r=0,76$ | (27) |
| 2017 год | $Y_{28}=0,021x+0,118$ | 0,021 | $r=0,94$ | (28) |
| 2018 год | $Y_{29}=0,023x+0,511$ | 0,023 | $r=0,98$ | (29) |
| 2016-2018 гг. | $Y_{30}=0,017x+0,24$ | 0,017 | $r=0,95$ | (30) |

При внесении меди в почву слоя 0-30 см до посадки эхинацеи пурпурной (2016 г.), содержание подвижной меди в почве (мг/кг) по годам оценивается математическими уравнениями (27-30), с соответствующими коэффициентами интенсивности действия единицы внесенной меди « b_{Cu} » от 0,008 до 0,023 мг Cu/кг почвы.

В среднем за три года проведенных исследований однократно внесенные медные удобрения увеличивают содержание меди на 0,017 мг/кг (уравнение 30), что соответствует 1 мг Cu/кг почвы 59 кг медных удобрений. Оптимальный уровень меди в почве 0,41 мг/кг при внесении $Cu_{9,4}$ кг/га (Таблица 5).

4.2 Взаимовлияние ионов цинка и меди при внесении микроудобрений

Установлено взаимное влияние Zn ↔ Cu удобрений, внесенных в почву (кг/га) на содержание подвижных форм данных элементов (мг/кг) в лугово-черноземной почве (уравнения 31-32):

$$Y_{Zn} = 0,55 Cu + 1,57; \quad r = 0,99 \quad (31)$$

$$Y_{Cu} = 0,004 Zn + 0,26; \quad r = 0,97 \quad (32)$$

В среднем за годы исследований (2016-2018 гг.) внесённые медные удобрения в оптимальной дозе (9,4 кг/га) способствовали увеличению подвижного цинка в почве на 0,55 мг/кг почвы. Один кг Zn внесенный в оптимальной дозе (21,4 кг/га) в среднем увеличивал содержание подвижной Cu в слое почвы 0-30 см на 0,004 мг/кг.

Исследованиями установлены оптимальные дозы цинка и меди на лугово-черноземной почве под эхинацею – 21,4 и 9,4 кг/га. На данных вариантах установлен оптимальный уровень содержания подвижного цинка и меди в почве (Таблица 5).

Так при внесении медных удобрений в оптимальной дозе 9,4 кгCu/га и формировании урожайности лекарственной культуры 13,2 т/га установлено оптимальное содержание в почве меди – 0,41 мг/кг и цинка 6,8 мг/кг.

Таблица 5 – Оптимальное содержание и соотношение микроэлементов в почве под растениями эхинацеи пурпурной при оптимизации питания медью и цинком

| Годы | Уровни содержания в почве, мг/кг | | Оптимальное соотношение | Урожайность, т/га |
|--|----------------------------------|------|--------------------------|---|
| | Zn | Cu | | |
| <i>При внесении медных удобрений (Cu_{9,4}) в почву</i> | | | | |
| 2016 год | 7,3 | 0,19 | Zn мг/кг ≈ 38.4 Cu мг/кг | Средняя–13,2/61%; Общая–39,6/60,3%; Сумма: наземная масса + корни–52,7/59,2% |
| 2017 год | 8,1 | 0,35 | Zn мг/кг ≈ 23.1 Cu мг/кг | |
| 2018 год | 5,1 | 0,70 | Zn мг/кг ≈ 7.3 Cu мг/кг | |
| 2016-2018 гг. | 6,8 | 0,41 | Zn мг/кг ≈ 16.6 Cu мг/кг | |
| <i>При внесении цинковых удобрений (Zn_{21,4}) в почву</i> | | | | |
| 2016 год | 6,9 | 0,17 | Zn мг/кг ≈ 40.6 Cu мг/кг | Средняя–9,9/20%; Общая–29,8/20,6%; Сумма: наземная масса + корни–40,3/21,8% |
| 2017 год | 9,9 | 0,33 | Zn мг/кг ≈ 30.0 Cu мг/кг | |
| 2018 год | 5,3 | 0,54 | Zn мг/кг ≈ 9.8 Cu мг/кг | |
| 2016-2018 гг. | 7,4 | 0,35 | Zn мг/кг ≈ 21.1 Cu мг/кг | |

4.3 Взаимосвязь урожайности эхинацеи пурпурной с содержанием цинка и меди в лугово-черноземной почве

Одной из основных задач наших исследований является моделирование режима питания Zn и Cu эхинацеи пурпурной в системе «почва-растение» и с учетом установленных связей прогнозировать отзывчивость данной культуры на внесение цинковых и медных удобрений в почву в конкретных зональных условиях.

Для этого с помощью математических методов моделирования режима питания между содержанием доступных элементов питания в почве и урожайностью эхинацеи пурпурной за годы исследований, установлена корреляционная зависимость ($r = 0,88-0,98$), (уравнения 33-36, Рисунки 1-2).

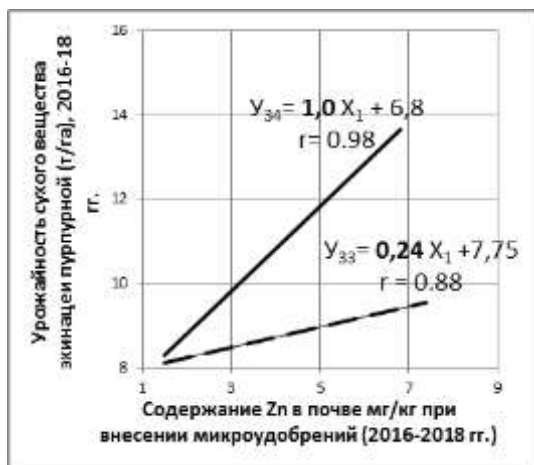


Рисунок 1 – Зависимость урожайности эхинацеи (2016-2018 гг.) от уровня содержания в почве цинка, мг/кг.

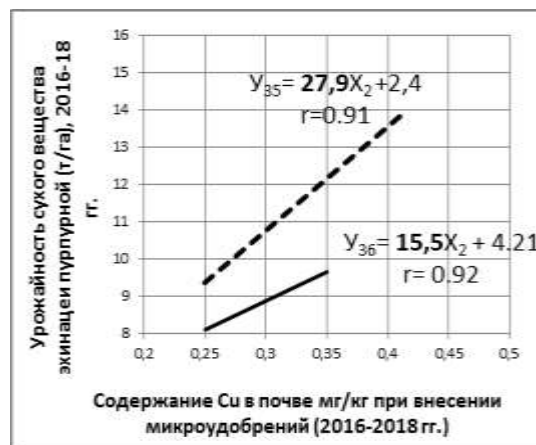


Рисунок 2 – Зависимость урожайности эхинацеи (2016-2018 гг.) от уровня содержания в почве меди, мг/кг.

Из уравнений 33-34, следует, при содержании подвижного цинка в пределах 0,5 ПДК Zn (7,4 мг Zn /кг) и 1 ПДК Cu (6,8 мг Cu/кг), в среднем за годы исследований способствует формированию урожайности биомассы эхинацеи пурпурной на 0,24 т/га при внесении цинка и 1,0 т/га при внесении меди (Рисунок 1).

Уравнения регрессии 35-36 свидетельствуют, что, при содержании подвижной меди в пределах 0,5 ПДК Zn (0,35 мг Zn /кг) и 1 ПДК Cu (0,41 мг Cu/кг) в среднем за годы исследований способствует формированию урожайности биомассы эхинацеи пурпурной на 27,9 т/га при внесении меди и 15,5 т/га при внесении цинка (Рисунок 2).

Полученные уравнения дают возможность выполнить прогноз урожайности эхинацеи пурпурной в зависимости от содержания подвижных цинка и меди мг/кг почвы.

4.4 Влияние микроудобрений цинка и меди на уровень содержания N-NO₃, P₂O₅ и K₂O в лугово-черноземной почве

При разработке почвенной диагностики потребности растений в удобрениях следует изучить закономерности поведения макроэлементов питания в почве при внесении оптимальных доз микроэлементов.

Установленные коэффициенты интенсивности действия «b» медных удобрений «b»_{N-NO₃} – 0,53-1,11; «b»_{P₂O₅} – 3,50-5,35; «b»_{K₂O} – 5,53-9,5 и цинковых удобрений «b»_{N-NO₃} – 0,29-0,52; «b»_{P₂O₅} – 0,75-1,29; «b»_{K₂O} – 1,83-1,73 на химический состав почвы являются реальными и практически значимыми показателями в системе: «удобрение (Zn, Cu, кг/га) → почва (N-NO₃, P₂O₅ и K₂O, мг/кг)». Получены оптимальные уровни содержания N-NO₃, P₂O₅, K₂O в слое почвы 0-30 см (Таблица 6).

Таблица 6 – Оптимальные уровни содержания нитратного азота, подвижного фосфора и обменного калия в слое почвы 0-30 см, мг/кг.

| Год жизни культуры | влияние Zn удобрений | | | влияние Cu удобрений | | |
|--------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|----------------------|-------------------------------|------------------|
| | N-NO ₃ | P ₂ O ₅ | K ₂ O | N-NO ₃ | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| 2016-2018 гг. | 21 | 76 | 161 | 20 | 93 | 178 |

4.5 Способность эхинацеи пурпурной к усвоению макро- и микроэлементов из почвы и удобрений

За годы исследования (2016-2018 гг.) был установлен средний вынос макро- и микроэлементов урожаем эхинацеи пурпурной на оптимальных вариантах: по меди (Cu_{9,4}): Cu – 0,068 кг/га, N – 252,1 кг, P₂O₅ – 59,3 кг, K₂O – 406,1 кг; по цинку (Zn_{21,4}): Zn – 0,146 кг/га, N – 200,7 кг, P₂O₅ – 40,4 кг, K₂O – 281,4 кг.

КИП из почвы на варианте с медью (Cu_{9,4}): Cu – 4,57%, N – 75%, P₂O₅ – 14,7%, K₂O – 58%; на варианте с цинком (Zn_{21,4}): Zn – 0,55%, N – 69,8%, P₂O₅ – 9,4%, K₂O – 54,7%.

КИУ из почвы на варианте Cu_{9,4} - по Cu – 0,55%, Zn – 2,45%, N – 86,01; на варианте Zn_{21,4} - по Zn – 0,51%, Cu - 0,04%, N – 44,92%.

При возделывании эхинацеи пурпурной на лугово-черноземной почве Западной Сибири, при получении максимальной урожайности (13,2 т/га) почва слоя 0-30 см должна содержать оптимальные уровни, мг/кг: подвижного Zn – 6,8, подвижной Cu – 0,41, N-NO₃ – 20, P₂O₅ – 93, K₂O – 178 при следующем сбалансированном ионном равновесии элементов в почве P₂O₅ мг/кг ≈ 4.6 N-NO₃ мг/кг ≈ 0.5 K₂O мг/кг ≈ 13.7 Zn мг/кг ≈ 224 Cu мг/кг (37).

5 РАСТИТЕЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ ЭХИНАЦЕИ ПУРПУРНОЙ

5.1 Взаимосвязь в питании растений при применении расчетных доз Zn и Cu под лекарственную культуру эхинацею пурпурную

Для использования данных химического анализа растений в целях диагностики минерального питания, необходимо знать, изменение содержания питательных веществ в растениях в зависимости от года жизни и фазы развития культуры (Ермохин Ю. И., 1995).

В исследованиях (2016-2018 гг.) по оптимизации цинкового и медного питания эхинацеи пурпурной установлено взаимовлияние между ионами «Cu ↔ Zn» при поступлении их в растения эхинацеи (Таблицы 7, 8).

Таблица 7 – Математические модели связи содержания цинка в растениях в фазу цветения (Y , мг/кг) от доз внесения Zn (X_1) и Cu (X_2) в почву (полевые опыты 2016-2018 гг.)

| Удобрения | Год жизни растений | Уравнение регрессии | | b | r |
|---|--------------------|--|------|-------|------|
| (X_1) Zn | Первый год | $Y_{\text{мг/кг Zn}} = 0,16Zn + 5,5;$ | (38) | 0,16 | 0,95 |
| | Второй год | $Y_{\text{мг/кг Zn}} = 0,30Zn + 4,55;$ | (39) | 0,30 | 0,98 |
| | Третий год | $Y_{\text{мг/кг Zn}} = 0,67Zn + 6,13;$ | (40) | 0,67 | 0,91 |
| | В среднем | $Y_{\text{мг/кг Zn}} = 0,378Zn + 5,39.$ | (41) | 0,378 | 0,94 |
| (X_2) Cu | Первый год | $Y_{\text{мг/кг Zn}} = 0,476 Cu + 5,45;$ | (42) | 0,476 | 0,99 |
| | Второй год | $Y_{\text{мг/кг Zn}} = 1,65 Cu + 4,99;$ | (43) | 1,65 | 0,98 |
| | Третий год | $Y_{\text{мг/кг Zn}} = 1,66 Cu + 7,53;$ | (44) | 1,66 | 0,92 |
| | В среднем | $Y_{\text{мг/кг Zn}} = 1,26 Cu + 5,99.$ | (45) | 1,26 | 0,97 |
| <i>Примечание – первый год – 2016 год, второй год – 2017 год, третий год – 2018 год, в среднем – 2016-2018 гг</i> | | | | | |

Полученные уравнения (38-41, Таблица 7) показывают, что каждый внесенный килограмм Zn в лугово-черноземную почву изменяет в растениях эхинацеи (« b ») в зависимости от года жизни растения.

В среднем за годы исследований коэффициент « b_{Zn} » был равен 0,378 мг Zn/кг (уравнение 41), что указывает на оптимальный уровень содержания Zn – 12,7 мг/кг растений, при внесении оптимальной дозы Zn 21,4 кг/га (Таблица 9).

При внесении меди в почву и поступления в растения Zn в период трех лет жизни, характеризуются уравнениями 42-45. Данные уравнения показывают, что разовое внесение оптимальных доз меди в почву, положительно влияют на содержание Zn в растениях (в среднем « b » - 1,26 мг/кг), (Таблица 7).

Многолетние исследования позволили установить положительное действие ацетатных форм меди на накопление Cu в растениях эхинацеи по годам исследования (Таблица 8, уравнения 46-49).

В среднем за годы исследований коэффициент « b_{Cu} » был равен 0,23 мг Cu /кг растений (уравнение 49), что указывает на оптимальный уровень содержания Cu – 4,3 мг/кг, при внесении оптимальной дозы Cu 9,4 кг/га (Таблица 9).

Синергические взаимосвязи $Zn \rightarrow Cu$ при поступлении в растения меди в период трех лет жизни лекарственного растения характеризуются математическими уравнениями 50-52. В среднем за годы исследований взаимосвязь характеризуется коэффициентом интенсивности действия « b » - 0,03 мг/кг, (уравнение 53, Таблица 8).

Таблица 8 – Математические модели связи содержания меди в растениях в фазу цветения (Y , мг/кг) от доз внесения Cu (X_1) и Zn (X_2) в почву

| Удобрения | Год жизни растений | Уравнение регрессии | | b | r |
|------------|--------------------|------------------------------------|------|-------|------|
| $(X_1) Cu$ | Первый год | $Y_{мг/кг Cu} = -0,039 Cu + 2,64;$ | (46) | 0,039 | 0,59 |
| | Второй год | $Y_{мг/кг Cu} = 0,42 Cu + 1,89;$ | (47) | 0,42 | 0,99 |
| | Третий год | $Y_{мг/кг Cu} = 0,30 Cu + 1,39;$ | (48) | 0,30 | 0,89 |
| | В среднем | $Y_{мг/кг Cu} = 0,23 Cu + 1,97.$ | (49) | 0,230 | 0,98 |
| $(X_2) Zn$ | Первый год | $Y_{мг/кг Cu} = -0,03 Zn + 2,4;$ | (50) | 0,03 | 0,99 |
| | Второй год | $Y_{мг/кг Cu} = -0,04 Zn + 1,72;$ | (51) | 0,04 | 0,82 |
| | Третий год | $Y_{мг/кг Cu} = -0,02 Zn + 1,82;$ | (52) | 0,02 | 0,72 |
| | В среднем | $Y_{мг/кг Cu} = -0,03 Zn + 1,98.$ | (53) | 0,03 | 0,89 |

Примечание – первый год – 2016 год, второй год – 2017 год, третий год – 2018 год, в среднем – 2016-2018 гг

Используя методы компьютерного моделирования, установлен уровень оптимального питания растений медью при внесении 1 ПДК Cu и уравновешенного соотношения микроэлементов в растениях ($Zn \approx 4.0 Cu$) при формировании высокого урожая лекарственного сырья 13,2 т/га (Таблица 9).

Таблица 9 – Уровни содержания и соотношения меди и цинка в растениях (фаза цветения), при внесении оптимальных доз микроудобрений.

| Годы жизни | Фактическое содержание Zn | Прогноз / Ошибка % | Фактическое содержание Cu | Прогноз / Ошибка % | Оптимальное соотношение, мг/кг |
|---|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Оптимальное уравновешенное питание эхинацеи пурпурной при внесении в почву 1 ПДК Cu | | | | | |
| <i>Первый год</i> | 9,8 | 9,9 / +1,1 | 2,24 | 2,27 / +1,3 | $Zn \approx 4.4 Cu$ |
| <i>Второй год</i> | 20,6 | 20,5 / +0,5 | 5,8 | 5,84 / +0,7 | $Zn \approx 3.6 Cu$ |
| <i>Третий год</i> | 20,8 | 23,1 / +11 | 4,8 | 4,21 / +14 | $Zn \approx 4.3 Cu$ |
| <i>В среднем</i> | 17,1 | 17,8 / +4,1 | 4,3 | 4,13 / -4,0 | $Zn \approx 4.0 Cu$ |
| Фактическое содержание и соотношение Zn и Cu при внесении в почву 0,5 ПДК Zn | | | | | |
| <i>Первый год</i> | 8,6 | 8,9 / +3,5 | 3,0 | 3,0 / - | $Zn \approx 2.9 Cu$ |
| <i>Второй год</i> | 10,7 | 10,9 / +1,9 | 2,8 | 2,6 / +7,1 | $Zn \approx 3.8 Cu$ |
| <i>Третий год</i> | 18,7 | 20,5 / +9,6 | 2,2 | 2,2 / - | $Zn \approx 8.5 Cu$ |
| <i>В среднем</i> | 12,7 | 12,6 / -0,8 | 2,66 | 2,63 / -1,1 | $Zn \approx 4.8 Cu$ |

Примечание – первый год – 2016 год, второй год – 2017 год, третий год – 2018 год, в среднем – 2016-2018 гг

Метод математического моделирования позволяет предложить оптимальные уровни содержания и соотношения элементов питания в растениях эхинацеи пурпурной, возделываемой на лугово-черноземной почве в зональных условиях Западной Сибири.

5.2 Содержание N_n, P_n, K_c в растениях эхинацеи пурпурной при внесении цинка и меди

В целях оперативной диагностики минерального питания лекарственного растения в период ее роста и развития, изучалось содержание основных элементов питания неорганического азота (N_n), неорганического фосфора (P_n) и свободного калия (K_c) в тканевых органах (листьях) культуры эхинацеи пурпурной в зависимости от уровня применяемых микроэлементов (цинка и меди) по годам исследования.

Моделирование режима минерального питания эхинацеи показывает, что за годы проведенных исследований установлены лучшие дозы микроэлементов (0,5 ПДК Zn 1,0 ПДК Cu), способствующие накоплению азота, фосфора и калия растениями эхинацеи пурпурной.

Установлено, что эхинацея пурпурная, способна накапливать оптимальное количество азота, фосфора и калия для формирования существенного урожая биомассы. В среднем при внесении меди : N_n – 118, P_n – 15, K_c – 273 мг/100 г., при внесении цинка: N_n – 110, P_n – 17, K_c – 293 мг/100 г.

5.3 Оптимальные уровни и соотношения элементов питания в растениях и их связи с урожаем

Определены оптимальные уровни химических элементов, способствующие получению высокой урожайности эхинацеи. Для получения максимального урожая культуры 13,2 т/га, в растениях должно содержаться Zn – 17,1, Cu – 4,3, N_n – 118, P_n – 15, K_c – 273 мг/кг. Оптимальное уравновешенное соотношение элементов в растениях: Zn ≈ 4.0 Cu; N_n ≈ 7.9 P_n ≈ 0.4 K_c ≈ 6.9 Zn ≈ 27.4 Cu (54).

6 УДОБРЕНИЕ И КАЧЕСТВО УРОЖАЯ ЭХИНАЦЕИ ПУРПУРНОЙ

Качество продуктов растениеводства – понятие очень многогранное. Оно включает в себя не только калорийность и белковость, но и качественный состав минеральных элементов и их соединений, обеспечивающие потребность в них человека и не вредящих его здоровью. Важнейшими показателями полноценности качества растений являются сухое вещество, общая зола, дубильные вещества (танины), аскорбиновая кислота (витамин С), каротин (витамин А), безазотистые экстрактивные вещества, цикоревая кислота, токсичные элементы (кадмий, мышьяк, ртуть, свинец).

6.1 Влияние цинка и меди на качество урожая эхинацеи пурпурной

В среднем за три года исследования (2016-2018 гг.) максимальное содержание сухого вещества (9,9-13,2 т/га) отмечается на варианте 0,5 ПДК Zn (21,4 кг/га) и ПДК Cu (9,4 кг/га).

В полевых исследованиях установлено, что в среднем процент общей золы в растениях эхинацеи пурпурной при применении цинковых удобрений (от 10,7...42,8 кг д.в./га) колебался от 6,63...7,42 %, при внесении медных удобрений в дозах 2,3-9,4 кг Cu/га значения общей золы снижались с увеличением расчетных доз от 6,83-6,34%.

Каждый кг цинковых и медных удобрений, однократно внесенных в почву в 2016 году, увеличивают содержание дубильных веществ в растениях в среднем за годы исследований на 0,13 и 0,41%.

Полученные уравнения прямой связи «удобрение → витамин С», свидетельствуют о влиянии внесенных микроэлементов на биосинтез аскорбиновой кислоты эхинацеи пурпурной на 0,05 мг% при внесении цинка и 0,3 мг% при внесении меди.

В среднем за годы исследований (2016-2018 гг.) 1 кг Zn и Cu в пределах оптимальных доз (21,4 и 9,4 кг/га) способствуют увеличению содержания каротина в растениях на 0,9 и 2,56 мг/кг.

Каждый кг цинка и меди внесенный в лугово-черноземную почву способствовал увеличению содержания экстрактивных веществ в растениях эхинацеи на 0,115 и 0,35 %.

Однократно внесенный в почву 1 кг Zn и Cu внесенный увеличивали содержание цикориевой кислоты в растениях эхинацеи на 0,009 и 0,0086 %.

6.2 Определение содержания тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном сырье эхинацеи пурпурной

Так внесение цинковых и медных удобрений способствовало незначительному увеличению содержания кадмия в лекарственном сырье от до 0,018 млн⁻¹, мышьяка до 0,008 мг/кг, ртути до 0,0014 мг/кг, свинца до 0,42 млн⁻¹.

Таким образом, применение цинка и меди под лекарственное растение эхинацею пурпурную с учетом системы «ПРОД» положительно влияет на накопление биологически активных соединений, а тем самым и на качество сырья данной лекарственной культуры.

7 БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ПОД ЭХИНАЦЕЮ ПУРПУРНУЮ

Расчет энергетической эффективности применения удобрений (КПД) позволяет наиболее точно, объективно и всесторонне оценивать систему удобрений во всех технологических процессах, связанных с возделыванием эхинацеи пурпурной. Так, в проведенных полевых опытах установлено, что наиболее энергетически эффективно (КПД – 22,38/19,14) применение оптимальных доз Cu (9,4 кг/га).

Результаты экономических расчетов показывают, при использовании

цинка и меди в рекомендуемых дозах на азотном фоне позволяет получать до 710 тыс. от ПДК Cu (9,4 кг/га) и до 200 тыс. от 0,5 ПДК Zn (21,4 кг/га) от реализации культуры и до 1 840 тыс./руб. от ПДК Cu (9,4 кг/га) от реализации корневищ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате исследований в 2016-2018 гг. было установлено влияние цинковых и медных удобрений на величину урожая лекарственного сырья эхинацеи пурпурной сорта Знахарь на лугово-черноземной почве юга Западной Сибири: максимальная урожайность биомассы 9,9 и 13,2 т/га абсолютно сухого вещества получены при разовом внесении цинка и меди в дозах 21,4 кг д.в./га (0,5 ПДК Zn) и 9,4 кг д.в./га (1 ПДК Cu), соответственно.

2. По результатам проведенных полевых и лабораторных исследований выявлены количественные характеристики интенсивности действия 1 кг Zn, Cu («b» – 0,34 и 2,13, т/га) на величину формирования биомассы. Предложены математические формулы с целью прогноза общей урожайности эхинацеи пурпурной и в дальнейшем расчета доз микроудобрений на планируемый урожай (ПУ т/га) по формулам (17-18): $D_{Zn} = (ПУ_{т/га} - ФУ_{т/га}) / 0,079$ кг/га (17), $D_{Cu} = (ПУ_{т/га} - ФУ_{т/га}) / 0,53$ кг/га (18).

3. Установлены нормативные характеристики действия 1 кг Zn, Cu /га на концентрацию подвижных форм исследуемых микроэлементов в диагностическом слое лугово-черноземной почвы («b» = 0,234 мгZn/кг и 0,017 мг Cu/кг). Полученные данные позволили определить оптимальный уровень элементов для конкретной почвы слоя 0-30 см при внесении оптимальных расчетных доз элементов: $Zn_{подв.} - 7,4$ мг/кг $Cu_{подв.} - 0,41$ мг/кг.

4. Получены математические связи о синергическом влиянии меди и цинка на содержание и соотношение данных элементов в почве. Каждый килограмм внесенного цинкового и медного удобрения в почву увеличивал содержание цинка (« b_{Zn} ») и меди (« b_{Cu} ») в почве, по годам жизни эхинацеи пурпурной (2016-2018 гг.). В среднем за годы проведенных исследований выявлены коэффициенты интенсивности действия для меди « b_{Cu} » равен 0,004 мг/кг (уравнение 32), для цинка « b_{Zn} » составил 0,55 мг/кг (уравнение 31). Однократное применение медных удобрений в оптимальной дозе (ПДК Cu – 9,4 кг/га) оптимальное содержание $Zn_{опт}$ в почве составляет 6,8 мгZn/кг почвы. Оптимальное содержание меди при внесении оптимальной дозы цинка (0,5 ПДК Zn – 21,4 кг/га) в среднем за годы исследований составляет 0,35 мг/кг. Данные оптимальные нормативные характеристики почвенной диагностики цинкового и медного питания эхинацеи пурпурной могут служить критериями оценки потребности в подвижном Zn и Cu почвы в зависимости от года жизни культуры.

5. Установлены оптимальные уровни (N-NO₃ – 20, P₂O₅ – 93, K₂O – 178, Cu – 0,41, Zn – 6,8 мг/кг) и ионное равновесие концентрации (P₂O₅ мг/кг ≈ 4.6 N-NO₃ мг/кг ≈ 0.5 K₂O мг/кг ≈ 13.5 Zn мг/кг ≈ 224 Cu мг/кг.) макро- и микроэлементов

в диагностическом слое лугово-черноземной почвы под лекарственной культурой эхинацеей пурпурной.

6. При сбалансированном медном питании (9,4 кгCu/га) оптимальное содержание: Zn – 17,1 мг/кг и Cu – 4,3 мг/кг растений, оптимальное соотношение: $Zn \approx 4.0 Cu$ мг/кг. При цинковом питании (21,4 кгZn/га) оптимальное содержание: Zn – 12,7 мг/кг и Cu – 2,66 мг/кг растений, оптимальное соотношение: $Zn \approx 4.8 Cu$ мг/кг.

7. Определены агрохимические нормативные характеристики при оптимальном сбалансированном питании эхинацеи пурпурной: ПЭУ, % (показатель эффективности микроудобрений): цинка – 1,07, меди – 0,274; азот мобилизации в почве под растением N_m – 265,4 кг/га; КИУ, % (коэффициент использования удобрений из почвы) – N – 75,0; Cu – 4,57; Zn – 1,08; P_2O_5 – 14,7; K_2O – 58%.

8. С помощью математического моделирования установлены уровни оптимального питания эхинацеи пурпурной неорганическими формами азота (N_n – 118, мг%), фосфора (P_n – 15, мг%) и калия (K_c – 273, мг%) в листьях фазы цветения и сбалансированным медным питанием: $N_n \approx 7.9 P_n \approx 0.1 K_c$.

9. Применение оптимальных доз цинка (21,4 кг/га) и меди (9,4 кг/га) в почву → биосинтез дубильных веществ в растениях – «b» – 0,13 и 0,41%, аскорбиновой кислоты – «b» – 0,30 и 0,05 мг%, каротина «b» – 2,56 и 0,9 мг/кг, экстрактивных веществ – «b» – 0,115 и 0,35 %, цикориевой кислоты – «b» – 0,009 и 0,0086 %. Применение меди и цинка в дозах (ПДК) на лугово-черноземной почве под эхинацею пурпурную не способствовали увеличению содержания Cd, As, Pb, Hg в лекарственном сырье.

10. Расчет биоэнергетической и экономической эффективности использования ацетатов показал, что внесение медных удобрений на фоне азотного питания рентабельно. Так, максимальный полученный КПД – 22,38 и 19,14 ед. энергии получен от прибавок урожайности надземной биомассы и корневищ лекарственной от однократно внесенных расчетных доз 1,0 ПДК медных удобрений.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

С целью получения высокой урожайности и качества лекарственного сырья эхинацеи пурпурной возделываемой на лугово-черноземной почве, применение медных и цинковых удобрений необходимо осуществлять, используя принципы «ИСПРОД» (интеграционной системы почвенно-растительной оперативной диагностики):

– внесение установленной оптимальной дозы меди в почву под эхинацею пурпурную (1 ПДК Cu – 9,4 кг/га), за три года жизни культуры увеличивает ее урожайность («b_{т/га}») на 5 т/га, способствует формированию общей средней урожайности биомассы сырья – 13,2 т/га.

– оптимальное содержание подвижного Zn и Cu в диагностическом слое (0-30 см) лугово-черноземной почвы – 6,8 и 0,41 мг/кг.

- оптимальное соотношение между Zn и Cu в почве составляет – 16.6.
- формула расчета доз медных удобрений по оптимальному химическому уровню состава почвы: $D_{Cu} = (\mathcal{E}_o - \mathcal{E}_ф) / 0,017$.
- оптимальные уровни содержания цинка и меди в растениях эхинацеи (фаза цветения) – 17,1 и 4,3 мг/кг. Соотношения цинка и меди в растениях эхинацеи пурпурной: $Zn \approx 4.0 Cu$.
- формула расчета доз меди по оптимальному уровню химического состава растений: $D = (Cu_{opt} - Cu_{ф}) / «b»$, кг/га.
- уравнения прогноза качества урожая эхинацеи пурпурной при внесении оптимальной дозы меди, кг/га: $Y_{Дуб. \text{ вец-в}} = 0,41 Cu_{кг} + 11,8$; $Y_{Аск. \text{ к-та}} = 0,30 Cu_{кг} + 3,13$; $Y_{Каротин} = 2,56 Cu_{кг} + 27,45$; $Y_{ЭВ} = 0,35 Cu_{кг} + 58,57$; $Y_{Цик.к-та} = 0,0086 Cu_{кг} + 9,42 - 0,07 Cu_{кг} + 2,75$

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Перспективы дальнейшей разработки темы исследований будут направлены на изучение влияния других микроэлементов (марганца, молибдена, селена и др.), находящихся в минимуме в почвах Западно-Сибирского региона, на урожайность и качество перспективной лекарственной культуры – эхинацеи пурпурной. Дальнейшее исследование будет направлено на расширение определяемых микроэлементов в почве и лекарственном сырье, что позволит выявить взаимовлияние одних элементов на другие.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в перечень Scopus и Web of Science

1. Жаркова, Н. Н. Содержание некоторых биологически активных веществ и химических элементов в лекарственном сырье *Echinacea purpurea l. Moenh* под влиянием эссенциального микроэлемента Cu / Н. Н. Жаркова, **В. В. Сухоцкая**, Ю. И. Ермохин // Сельскохозяйственная биология. – 2020. – Том 55. – № 3. – С. 588-596.
2. Zharkova, N. N. Impact of the use of essential trace elements (zinc, copper) on the chemical composition of perennial medicinal plant in southern Western Siberia / N. N. Zharkova, **V. V. Suhotskaya**, Yu. I. Yermokhin // International Conference on World Technological Trends in Agribusiness. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – 624. Doi: 10.1088/1755-1315/624/1/012179.

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

3. **Сухоцкая, В. В.** Влияние цинковых удобрений на химический состав и качество растений эхинацеи пурпурной (*Echinacea purpurea*) / В. В. Сухоцкая, Н. Н. Жаркова, Ю. И. Ермохин // Вестник АПК Ставрополя. – 2018. – № 4 (34). – С. 128-131.

4. **Suhotskaya, V. V.** Soil diagnostics of the needs of *Echinacea purpurea* l. zinc fertilizers in the conditions of the southern forest steppe of Western Siberia / V. V. Suhotskaya, N. N. Tishchenko, Yu. I. Yermokhin // Проблемы агрохимии и экологии. – 2018. – № 3. – С. 31-34.

5. **Сухоцкая, В. В.** Влияние медных удобрений на формирование урожайности лекарственного сырья эхинацеи пурпурной (*Echinacea purpurea*) / В. В. Сухоцкая, Н. Н. Жаркова, Ю. И. Ермохин // Вестник КрасГАУ. – 2019. № 2 (143). – С. 38-44.

6. Жаркова, Н. Н. Формирование урожая лекарственных культур (*Tanacetum vulgare* L., *Echinacea purpurea* L.) под влиянием эссенциальных микроэлементов / Н. Н. Жаркова, **В. В. Сухоцкая**, Ю. И. Ермохин // Овощи России. – 2019. – № 5 (49). – С. 72-76. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-5-72-76>

7. Жаркова, Н. Н. Эффективность применения цинковых удобрений при выращивании лекарственных культур в условиях Западной Сибири / Н. Н. Жаркова, **В. В. Сухоцкая**, Ю. И. Ермохин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2020. – Том 13. – № 1 (64). – С. 77-84.

8. Жаркова, Н. Н. Интенсивность биологического накопления микроэлементов (цинка и меди) растениями *Echinacea purpurea* L. в условиях Западной Сибири / Н. Н. Жаркова, **В. В. Сухоцкая**, Ю. И. Ермохин // Овощи России. – 2020. – № 2. – С. 87-90. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-2-87-90>

9. Жаркова, Н. Н. Почвенная диагностика потребности тысячелистника обыкновенного (*Achillea millefolium* L.) и эхинацеи пурпурной (*Echinacea purpurea* L.) в медных удобрениях в условиях Омской области / Н. Н. Жаркова, **В. В. Сухоцкая**, Ю. И. Ермохин // Проблемы агрохимии и экологии. – 2020. – № 4. – С. 18-23. DOI: 10.26178/AE.2020.18.92.003.

10. Жаркова, Н. Н. Оценка элементного химического состава лекарственного сырья *Achillea millefolium* L. и *Echinacea purpurea* L. при внесении в почву цинка и меди / Н. Н. Жаркова, **В. В. Сухоцкая**, Ю. И. Ермохин // Земледелие. – 2021. – № 1. – С. 19-22. Doi:10.24411/0044-3913-2021-10105.

Публикации в изданиях, включенных в перечень РИНЦ

11. Тищенко, Н. Н. Влияние тяжелых металлов на лабораторную всхожесть семян эхинацеи пурпурной / Н. Н. Тищенко, **В. В. Сухоцкая**, Т. В. Кейних [и др.] // Молодой ученый. – 2016. – № 21(125). – С. 265-268.

12. **Сухоцкая, В. В.** Влияние ацетата цинка и меди на энергию прорастания семян эхинацеи пурпурной / В. В. Сухоцкая, Н. Н. Тищенко, Ю. И. Ермохин // Всемирный день охраны окружающей среды (экологические чтения-2017): Материалы Международной научно-практической конференции, Омск, 03–05 июня 2017 года. – Омск: ЛИТЕРА, 2017. – С. 274-277.

13. Унру, Е. П. Оценка влияния ацетата меди и цинка на урожайность эхинацеи пурпурной / Е. П. Унру, Т. И. Захарова, Н. Б. Магзумова, **В. В. Сухоцкая**, Н. Н. Тищенко // Проблемы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов : сборник I региональной (заочной) научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся посвященной 100-летию Омского государственного аграрного университета, ОМСК, 06 декабря 2017

года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2018. – С. 204-209.

14. **Сухоцкая, В. В.** Влияние цинка и меди на всхожесть семян эхинацеи пурпурной / Н. Н. Тищенко, В. В. Сухоцкая // Проблемы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов : сборник I региональной (заочной) научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся посвященной 100-летию Омского государственного аграрного университета, Омск, 06 декабря 2017 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2018. – С. 340-344.

15. **Сухоцкая, В. В.** Последствие медных и цинковых удобрений на продуктивность *Echinacea purpurea* / Н. Н. Тищенко, В. В. Сухоцкая // Научные инновации - аграрному производству : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию Омского ГАУ, Омск, 21 февраля 2018 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2018. – С. 427-431.

16. **Сухоцкая В. В.** Влияние медных удобрений на химический состав лекарственного сырья эхинацеи пурпурной / Н. Н. Тищенко, В. В. Сухоцкая // Экологические чтения – 2018 : Международная научно-практическая конференция посвящается 100-летию образования Омского государственного аграрного университета им. П.А. Столыпина, Омск, 04–06 июня 2018 года. – Омск: ЛИТЕРА, 2018. – С. 302-306.

17. **Сухоцкая В. В.** Оценка влияния меди на химический состав растений эхинацеи пурпурной / В. В. Сухоцкая, Н. Н. Тищенко, Ю. И. Ермохин // Современные научно-практические решения в АПК : Сборник статей II всероссийской (национальной) научно-практической конференции Тюмень, 26 октября 2018 года / Государственный аграрный университет Северного Зауралья. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2018. – С. 60-65.

18. **Сухоцкая, В. В.** Сравнительная оценка влияния микроэлементов на урожайность *Achillea millefolium* L. и *Echinacea purpurea* в условиях южной лесостепи Западной Сибири / В. В. Сухоцкая, Н. Н. Жаркова, Ю. И. Ермохин // Приоритетные направления научно-технологического развития агропромышленного комплекса России : материалы Национальной научно-практической конференции, Рязань, 22 ноября 2018 года. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2019. – С. 552-556.

19. Лизюков, А. В. Оценка влияния цинковых удобрений на содержание цинка в растениях эхинацеи пурпурной / А. В. Лизюков, Н. Н. Жаркова, **В. В. Сухоцкая** // Экологические чтения - 2019 : X Национальная научно-практическая конференция (с международным участием) посвящается 25-летию Омского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина в статусе университета, Омск, 05 июня 2019 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2019. – С. 221-225.

20. Ходенко, С. В. Оценка влияния ацетата меди на урожайность лекарственного сырья эхинацеи пурпурной (*Echinacea purpurea*) / С. В. Ходенко, Н. Н. Жаркова, **В. В. Сухоцкая** // Экологические чтения - 2019 : X Национальная научно-практическая конференция (с международным участием) посвящается 25-летию Омского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина в статусе университета, Омск, 05 июня 2019 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2019. – С. 404-409.

21. **Сухоцкая, В. В.** Агроэкологическая эффективность использования цинка и меди при возделывании эхинацеи пурпурной / В. В. Сухоцкая // Экологические чтения - 2020 : сборник материалов XI Национальной научно-практической конференции (с международным участием), Омск, 05 июня 2020 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2020. – С. 558-564.