

На правах рукописи

БОЛДЫШЕВА Елена Павловна

**ДИАГНОСТИКА И ОПТИМИЗАЦИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО
ПИТАНИЯ ОЗИМОЙ РЖИ НА ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЁМНОЙ ПОЧВЕ
ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

06.01.04 – Агрохимия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Тюмень – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина».

Научный руководитель: доктор сельскохозяйственных наук, зав. кафедрой агрохимии ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина»
Бобренко Игорь Александрович

Официальные оппоненты: **Конарбаева Галина Акмуллдиновна**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии почв ФГБУН «Институт почвоведения и агрохимии» СО РАН
Совриков Андрей Борисович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры почвоведения и агрохимии ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится 23 мая 2018 г. в 13-30 на заседании диссертационного совета Д 999.114.02 при ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья» по адресу:

625003, г. Тюмень, ул. Республики, 7
Телефон/факс: 8(3452) 29-01-52, e-mail: diss@tsau.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного университета Северного Зауралья по адресу и на сайте университета <http://www.tsau.ru>

Автореферат разослан «22» марта 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор с.-х. наук

Турсумбекова Галина Шалкаровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Россия является ведущей ржанопроизводящей державой: на её долю приходится более одной трети всех посевов и четверть валового сбора зерна ржи в мире. Являясь важнейшей продовольственной и кормовой культурой, озимая рожь в России возделывается на площади около 1,7 млн. га, что составляет в структуре посевных площадей озимых культур 10-15 % .

Рожь часто возделывается на бедных почвах, поэтому внесение удобрений имеет большое значение для повышения её урожаев. Применение минеральных удобрений, содержащих азот, фосфор и калий, необходимо сочетать с микроудобрениями. При дефиците микроэлементов в почве применение микроудобрений способствует росту урожайности культур, повышению качества продукции и улучшению здоровья населения и сельскохозяйственных животных (Аристархов А.Н., 2012).

По данным агрохимического мониторинга плодородия чернозёмных почв Омской области содержание подвижного цинка характеризуется как недостаточное. Низкое содержание этого микроэлемента отмечено на 2878,5 тыс. га или 98,9 % обследованной площади. Содержание подвижных меди и марганца в черноземных почвах Омской области также часто находятся на низком (соответственно 47,1 и 11,6 % обследованных площадей) и среднем уровне (50,0 и 69,1 %) (Красницкий В.М., 2002).

Одним из прогрессивных методов оптимизации питания сельскохозяйственных культур является система почвенно-растительной диагностики «ПРОД», разработанная на кафедре агрохимии и почвоведения Омского ГАУ под руководством профессора Ю.И. Ермохина (1983, 2014).

Цель исследований - разработка параметров управления микроэлементного питания (Zn, Cu, Mn) растений озимой ржи на основе почвенно-растительной диагностики.

Задачи исследований:

- выявить действие микроудобрений (Zn, Cu, Mn) на урожайность и качество озимой ржи на лугово-чернозёмной почве при сбалансированном азотно-фосфорно-калийном питании;
- установить оптимальные дозы цинковых удобрений при основном внесении и цинковых, медных, марганцевых удобрений при опудривании семян;
- установить взаимосвязь между содержанием цинка в почве, растениях ржи, дозами применяемых удобрений и величиной и качеством урожая;
- установить оптимальный уровень содержания доступного цинка в почве для растений озимой ржи;
- установить оптимальные уровни и соотношения основных макро- и микроэлементов в растениях для диагностирования культуры в удобрениях;
- дать экономическую и биоэнергетическую оценку применения микроудобрений под озимую рожь.

Научная новизна исследований. Впервые в условиях южной лесостепи Западной Сибири выявлены математические закономерности, отражающие зависимость величины и качества урожая, химического состава почвы и растений от количества применяемых микроудобрений и на основе этого определены оптимальные уровни содержания подвижного цинка в почве, макро- и микроэлементов в растениях озимой ржи в течение вегетации, установлены нормативные показатели выноса элементов питания урожаем, коэффициенты использования питательных веществ из почвы и удобрений и интенсивность действия единицы цинковых удобрений на химический состав почвы и растений. Разработанные параметры позволяют диагностировать состояние микроэлементного питания на основе системы почвенно-растительной оперативной диагностики «ПРОД». Установлены оптимальные дозы микроудобрений (Zn, Cu, Mn) при опудривании семян при выращивании озимой ржи на лугово-чернозёмной почве.

Основные положения, выносимые на защиту:

- установленные оптимальные уровни содержания подвижного цинка в почве, содержание и соотношение макро- и микроэлементов в растениях позволяют диагностировать состояние минерального питания растений озимой ржи;
- применение агрохимических нормативных параметров почвенно-растительной диагностики (оптимальное содержание подвижного цинка в почве, оптимальные уровни содержания и соотношение элементов в растениях, затраты элементов питания на создание 1 тонны урожая, коэффициенты использования и интенсивности действия удобрений на химический состав почвы и растений) обеспечивает внесение микроудобрений в оптимальных дозах.

Практическая значимость и реализация результатов исследования. На основе агрохимических исследований почв и растений получены закономерности действия микроудобрений на обеспеченность озимой ржи микроэлементами, которые дают возможность оптимизировать поступление макро- и микроэлементов (Zn, Cu, Mn) в растения озимой ржи, создавая уравновешенное питание на основе принципов системы почвенно-растительной диагностики. Применение разработанных параметров позволяет оптимизировать микроэлементное питание озимой ржи в условиях лугово-чернозёмных почв лесостепи Западной Сибири, тем самым управлять процессом формирования величины и качества урожая зерна.

Результаты исследований прошли производственную проверку в ООО «РУСКОМ-Агро» Омской области, внедрены в учебный процесс.

Личный вклад. В основу настоящей работы положены собственные исследования автора. Автор принимала непосредственное участие в составлении методики опыта. Самостоятельно проводила опыты и наблюдения в полевых и лабораторных условиях, обобщала и анализировала экспериментальные данные, написала текст диссертации.

Апробация работы. Основные результаты исследований были представлены докладами и обсуждены на Всероссийских молодежных научных конференциях «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность» (г. Омск, 2009, 2013), Международной научно-практической конференции, посвященной 45-летию факультета агрохимии, почвоведения и экологии Омского государственного аграрного университета (г. Омск, 2009), 44-й Международной научной конференции молодых учёных и специалистов (г. Москва, 2010), IV Международной научной конференции молодых учёных, посвящённой 40-летию СО Россельхозакадемии (г. Новосибирск, 2010), Международной научно-практической конференции «Диагностика и управление минеральным питанием растений» (г. Омск, 2010), научно-практической конференции «Проблемы безопасности. Технологии и управление» (г. Омск, 2012), II и III Международной конференции «Иновационные разработки молодых учёных – развитию агропромышленного комплекса» (г. Ставрополь, 2013, 2014), III Международной научно-практической конференции «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия» (г. Новосибирск, 2014), Международной научно-практической конференции обучающихся в магистратуре (г. Омск, 2014), Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции, посвящённой 100-летнему юбилею со дня образования учебной лаборатории Агрометеорологии ФГБОУ ВО Омский ГАУ (г. Омск, 2016), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Перспективы производства продуктов питания нового поколения» (г. Омск, 2017), научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов ФГБОУ ВО Омский ГАУ в 2009-2017 гг. и опубликованы в двадцати печатных работах общим объемом 12 п.л., в том числе четыре работы в ведущих рецензируемых научных журналах.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 167 страницах. Состоит из введения, шести глав, заключения и рекомендаций производству. Содержит 36 таблиц, 19 рисунков, 12 приложений. Библиографический список включает 202 наименования, в том числе 15 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1 Биологические особенности и минеральное питание озимой ржи (обзор литературы)

В главе приведен обзор литературы по вопросам: 1. история, значение и биологические особенности озимой ржи; 2. особенности минерального питания озимой ржи; 3. содержание микроэлементов в почве; 4. физиологическая роль микроэлементов; 5. влияние микроудобрений на продуктивность культурных растений; 6. диагностика минерального питания растений. Для эффективного применения удобрений, своевременной и точной корректировки условий питания сельскохозяйственных культур, определения величины урожая и его качества задолго до уборки научной школой профессора Ю.И. Ермохина

разработана система «ПРОД», которая включает в себя три блока: 1) установление обеспеченности растений макро- и микроэлементами до сева (посадки) на основе почвенной диагностики (ПД); 2) контроль питания растений в период их активного роста и развития на основе растительной диагностики (РД); 3) научное прогнозирование величины и биологической полноценности продукции по установленным прогнозируемым формулам. Данная концепция нами использовалась для оптимизации питания озимой ржи.

2 Объекты, методика и условия проведения исследований

Объектами исследований являлись: растения озимой ржи (сорт Сибирь 3), лугово-черноземная среднемощная среднегумусовая тяжелосуглинистая почва, азотные, фосфорные, калийные, цинковые, медные и марганцевые удобрения.

2.1 Метеорологические условия. Погодные условия в годы исследований были различны как по тепло-, так и по влагообеспеченности. Вегетационные периоды 2007-2008 гг., 2009-2010 гг. и 2011-2012 гг. были более жаркими и засушливыми, а 2008-2009 гг., 2010-2011 гг. более холодными и влажными.

2.2 Агрохимическая характеристика почвы.

Содержание в пахотном слое почвы опытного участка нитратного азота и подвижного фосфора – среднее, обменного калия – высокое, подвижных цинка, меди и марганца – низкое.

2.3 Общие сведения о методике полевого опыта. Полевые опыты проведены в течение 2007-2012 гг. Закладку опытов с удобрениями, все учеты и наблюдения проводили по общепринятым методикам.

Для проведения исследований по оптимизации микроэлементного питания озимой ржи были заложены три полевых опыта с удобрениями.

Опыт № 1. Влияние различных способов применения цинковых удобрений при возделывании озимой ржи (2007-2011 гг.): 1. N_{30} , 2. $N_{30} + Zn_4$, 3. $N_{30} + Zn_8$, 4. $N_{30} + Zn_{12}$, 5. $N_{30}P_{60}$, 6. $N_{30}P_{60} + Zn_4$, 7. $N_{30}P_{60} + Zn_8$, 8. $N_{30}P_{60} + Zn_{12}$, 9. $N_{30}P_{60} + Zn_{50*}$, 10. $N_{30}P_{60} + Zn_{100*}$, 11. $N_{30}P_{60} + Zn_{150*}$ (* - опудривание семян микроэлементами, г/ц.).

Опыт № 2. Предпосевная обработка семян озимой ржи солями микроэлементов (2007-2011 гг.): 1. $N_{30}P_{60}K_{60}$ – фон, 2. Фон + Zn_{50} , 3. Фон + Zn_{100} , 4. Фон + Zn_{150} , 5. Фон + Cu_{50} , 6. Фон + Cu_{100} , 7. Фон + Cu_{150} , 8. Фон + Mn_{50} , 9. Фон + Mn_{100} , 10. Фон + Mn_{150} .

Варианты с дозами Zn_{12} и Zn_{150} , Cu_{150*} , Mn_{150*} были введены в схему исследований в 2009 г. для изучения повышенного уровня микроэлементного питания.

Опыт № 3. Применение расчётных доз цинковых удобрений в основное внесение (2010-2012 гг.): 1. $N_{30}P_{60}$ – фон, 2. Фон + $Zn_{3,4}$ (ОУ), 3. Фон + $Zn_{6,6}$ (ОУ), 4. Фон + $Zn_{11,3}$ (ПО).

Агротехника общепринятая для этой зоны. В начале августа – основная обработка почвы ПН-8-35 на глубину 20-22 см. Посев в третьей декаде августа, пунктирный, на глубину 5-6 см, сеялкой ССФК-7 с междурядьями 15 см; норма высева – 6,0 млн. всхожих зёрен на гектар. После посева – прикатывание

кольчатыми катками ЗКК-3А. Учёт урожая в фазу восковой спелости. Уборку урожая осуществляли в середине периода восковой спелости зерна, когда озимая рожь имеет 85 % восковой и 10 % полной спелости прямым комбайнированием «HEGE-125». Площадь учётной делянки – 15 м². Повторность вариантов трехкратная, расположение повторностей в один ярус, вариантов – систематическое. Учёт и наблюдения за ростом и развитием растений, отбор растительных проб были приурочены к фазам развития и уборке культуры.

Использовались формы удобрений: аммиачная селитра (N – 34,5 %); суперфосфат двойной (P₂O₅ – 46 %); хлористый калий (KCl – 60 %), сернокислый цинк (Zn – 22 %), сернокислая медь (Cu – 22,5 %), сернокислый марганец (Mn – 22,8 %).

Аналитические работы выполнены на кафедре агрохимии и почвоведения ФГБОУ ВО Омский ГАУ, ФГБНУ «Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства» (определение качества зерна в лаборатории качества зерна), в ЦАС «Омский» (определение содержания микроэлементов). В почвенных пробах определяли нитратный азот, подвижный фосфор, обменный калий стандартными методами. Определение подвижных форм цинка, меди и марганца определяли в ацетатно-аммонийных вытяжках из почв методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ГОСТ Mn Р 50685-94; ГОСТ Cu Р 50683-94; ГОСТ Zn Р 50686-94) - Метод Крупского и Александровой. В растительных пробах определяли сухое вещество и валовые формы азота, фосфора и калия из одной вытяжки после озоления по Гинзбург (ГОСТ 26107-84) и др. Определение содержания белка (ГОСТ 10846-91), натуры и стекловидности (ГОСТ 10987-79), число падения (ГОСТ 30498-97) по общепринятым методикам.

Статическую обработку данных проводили методом дисперсионного и корреляционного анализа (Доспехов Б.А., 1985), биоэнергетическую и экономическую оценку – согласно рекомендациям (Ермохин Ю.И., Неклюдов А.Ф., 1994).

3 Диагностика потребности озимой ржи в удобрениях на основе полевого опыта

Основным способом оценки потребности растений в удобрении служит полевой опыт, который позволяет установить роль и закономерности влияния отдельных элементов питания почвы и растений в формировании величины и качества урожая, наилучшие дозы и сочетания минеральных удобрений на почвах с различным уровнем содержания питательных веществ.

3.1 Применение микроудобрений и урожайность зерна озимой ржи.

Выявлено положительное действие цинковых удобрений на урожайность озимой ржи в зависимости от доз и способов применения на различных фонах (табл.1).

Таблица 1 – Эффективность внесения цинковых удобрений различными способами при возделывании озимой ржи на лугово-черноземной почве (среднее 2008-2011 гг., опыт №1)

Варианты	Урожайность, т/га	Прибавка			
		т/га к фонам		% к фонам	
		N ₃₀	N ₃₀ P ₆₀	N ₃₀	N ₃₀ P ₆₀
N ₃₀	3,91	-	-	-	-
N ₃₀ + Zn ₄	4,02	0,11	-	2,81	-
N ₃₀ + Zn ₈	4,33	0,42	-	10,74	-
N ₃₀ + Zn ₁₂ **	4,02	0,11	-	2,81	-
N ₃₀ P ₆₀	4,22	0,31	-	7,93	-
N ₃₀ P ₆₀ + Zn ₄	4,72	0,81	0,50	20,72	11,85
N ₃₀ P ₆₀ + Zn ₈	4,03	0,12	-0,19	3,10	-4,50
N ₃₀ P ₆₀ + Zn ₁₂ **	4,39	0,48	0,17	12,28	4,03
N ₃₀ P ₆₀ + Zn ₅₀ *	4,21	0,30	-0,01	7,67	-0,24
N ₃₀ P ₆₀ + Zn ₁₀₀ *	4,79	0,88	0,57	22,51	13,51
N ₃₀ P ₆₀ + Zn ₁₅₀ **	4,44	0,53	0,22	13,55	5,21
HCP ₀₅	0,24				

Примечание: * - граммов соли микроэлемента на 1 центнер семян

** - данные за 2010-2011 гг.

Максимальная урожайность на фоне N₃₀ получена в варианте с внесением цинка в дозе 8 кг д.в./га и составила 4,33 т/га. На фоне N₃₀P₆₀ максимальная урожайность получена в варианте с внесением цинка в дозе 4 кг д.в./га и составила 4,72 т/га.

Обработка семенного материала озимой ржи сернокислой солью цинка способствовала увеличению урожайности зерна. При опудривании цинком в дозах Zn₅₀, Zn₁₀₀, Zn₁₅₀ получена урожайность соответственно: 4,21; 4,79; 4,44 т/га. Наиболее эффективной являлась доза 100 г/ц, что позволило получить прибавку зерна 0,57 т/га (13,51 %) по сравнению с фоном N₃₀P₆₀.

В исследованиях установлено, что 1 кг внесённого цинка (при дозе 4 кг д.в./га) увеличивал урожайность озимой ржи на 0,125 т (b₁ – коэффициент интенсивности действия цинка на урожайность зерна):

$$b_1 = \Pi : \Delta, \quad b_1 = 0,50 : 4 = 0,125 \text{ т/га}, \quad (1)$$

где Π – прибавка урожая, т/га; Δ – доза удобрения, кг/га.

Опудривание семенного материала озимой ржи сернокислыми солями цинка, меди и марганца способствовало увеличению урожайности зерна (полевой опыт № 2, табл. 2).

Урожайность зерна озимой ржи на фоне составила 4,36 т/га. Наибольшая эффективность при применении сернокислых цинка и меди отмечена при дозе 100 г/ц семян – получены урожайности 4,84 т/га и 4,73 т/га соответственно (11,01 % и 8,49 % к фону), марганца – при дозе 50 г/ц семян – 4,86 т/га (11,47 % к фону).

Таблица 2 – Влияние обработки семян микроэлементами (г/ц) на урожайность озимой ржи, возделываемой на лугово-черноземной почве (среднее 2008-2011 гг., опыт №2)

Варианты	Урожайность, т/га	Прибавка	
		т/га к фону	% к фону
N ₃₀ P ₆₀ K ₆₀ - фон	4,36	-	-
Фон + Zn ₅₀	4,79	0,43	9,86
Фон + Zn ₁₀₀	4,84	0,48	11,01
Фон + Zn ₁₅₀ *	4,44	0,08	1,83
Фон + Cu ₅₀	4,44	0,08	1,83
Фон + Cu ₁₀₀	4,73	0,37	8,49
Фон + Cu ₁₅₀ *	4,48	0,12	2,75
Фон + Mn ₅₀	4,86	0,50	11,47
Фон + Mn ₁₀₀	4,33	-0,03	-0,69
Фон + Mn ₁₅₀ *	4,56	0,20	4,59
HCP ₀₅	0,19		

Примечание: * - данные за 2010-2011 гг.

Показатель эффективности цинковых удобрений " b_1 " позволяет в конкретных условиях на лугово-черноземной почве проводить планирование прибавок урожая зерна. Учитывая, что для получения 1 т/га зерна озимой ржи требуется 8 кг ($\frac{1\text{кг} \cdot 1\text{т} / \text{га}}{0,125 \text{ кг} / \text{га}} = 8,0$) действующего вещества цинка, можно рассчитать прибавки урожая зерна по формуле (2):

$$\Pi = \frac{D}{8}, \quad (2)$$

где Π – планируемая прибавка урожайности зерна, т/га; D – доза внесения цинка, кг д.в./га; 8 – затраты количества внесенного цинка для получения 1 тонны зерна, кг д.в./га.

При этом необходимо учитывать, что максимальная доза цинка не может превышать 4 кг д.в./га.

Зная планируемую прибавку урожая (Π , т/га) и коэффициент интенсивности действия цинка ($b_1 = 0,125$ т/га), можно спрогнозировать дозы внесения цинка (кг/га) под озимую рожь по формуле (3) при максимальной возможной прибавке 0,5 т/га.

$$D = \frac{\Pi}{b_1}. \quad (3)$$

3.2 Влияние микроудобрений на структуру урожая озимой ржи. Максимальное количество стеблей при основном внесении сформировалось в варианте N₃₀P₆₀Zn₄ – 8,5, а при опудривании – в варианте N₃₀P₆₀Zn₁₀₀ – 8,6 штук. В этих же вариантах опыта отмечается и максимальный показатель продуктивной кустистости или числа нормально развитых вызревших колосьев,

приходящихся на одно растение. Наибольшая масса 1000 зерен (45,0 и 45,1 г соответственно) также сформировалась в этих вариантах, что объясняет формирование максимальной урожайности зерна в опыте. При опудривании семян цинковыми (Zn_{100}), медными (Cu_{100}) и марганцевыми (Mn_{50}) удобрениями наблюдалось максимальное количество продуктивных стеблей – 7,2; 6,3 и 6,5 штук на растении соответственно. В этих же вариантах наблюдалась наибольшая урожайность.

3.3 Метод определения доз цинковых удобрений на основе данных полевого опыта. Расчет доз удобрений на основе данных полевого опыта (ПО) производится по формуле (4):

$$Дп = Дo \cdot Xo / Xп. \quad (4)$$

В исследованиях при сбалансированном макроэлементном питании наиболее эффективным было внесение 4 кг д.в./га цинковых удобрений. Таким образом, при содержании цинка в слое почвы 0-30 см перед посевом 0,58 мг/кг, доза цинковых удобрений (кг/га) под озимую рожь может определяться по формуле:

$$Д_n = \frac{4 \cdot 0,58}{X_n} \quad \text{или} \quad Д_{Zn} = \frac{2,32}{C_{Zn}}.$$

4 Почвенная диагностика потребности озимой ржи в микроудобрениях

Для разработки почвенной диагностики (первый блок ПД системы «ПРОД») состояния минерального питания озимой ржи необходимо установление закономерностей действия удобрений на химический состав почвы.

4.1 Влияние удобрений на содержание микроэлементов в почве. В пахотном горизонте содержание подвижных форм меди практически не изменяется (0,10-0,14 мг/кг). Содержание марганца варьирует значительно сильнее (с 49,4 мг/кг перед посевом до 41,7 мг/кг в фазу весеннего кущения). Концентрация цинка изменяется в меньшей степени (0,53-0,61 мг/кг).

4.2 Связь величины урожая озимой ржи с содержанием цинка в почве и уровня обеспеченности им растений. При увеличении доз цинка наблюдалось увеличение содержания подвижного цинка в почве с 0,79-0,80 до 2,61-2,97 мг/кг (табл. 3). Проведённые исследования позволили получить уравнения 5 и 6, отображающие зависимость содержания цинка в почве от доз применяемых цинковых удобрений.

Коэффициент интенсивности действия « b_2 » цинковых удобрений на содержание подвижного цинка в почве равен 0,171 мг/кг.

Для решения практических задач можно прогнозировать содержание цинка в почве (С, мг/кг) при внесении цинковых удобрений, используя формулу (7):

$$С = С_1 + Д \cdot b_2, \quad (7)$$

где $С_1$ – содержание элемента в почве до посева, мг/кг; $Д$ – доза внесения элемента в почву, кг д.в./га; b_2 – коэффициент интенсивности действия килограмма внесенного цинка на содержание данного элемента в почве, мг/кг.

Таблица 3 – Влияние цинковых удобрений на содержание подвижного цинка в лугово-чернозёмной почве в фазу осеннего кущения при возделывании озимой ржи (слой почвы 0-30 см, среднее 2007-2011 гг.)

Варианты	Содержание Zn в почве, мг/кг	Увеличение Zn в почве после внесения цинковых удобрений, мг/кг	Уравнение регрессии
N_{30}	0,80	-	$y = 0,180x + 0,808$ $r = 0,89 (5)$
$N_{30} + Zn_4$	1,54	0,74	
$N_{30} + Zn_8$	2,26	1,46	
$N_{30} + Zn_{12}^*$	2,97	2,17	
$N_{30}P_{60}$	0,79	-	$y = 0,150x + 0,825$ $r = 0,81 (6)$
$N_{30}P_{60} + Zn_4$	1,48	0,69	
$N_{30}P_{60} + Zn_8$	2,02	1,23	
$N_{30}P_{60} + Zn_{12}^*$	2,61	1,82	

Примечание: * - данные за 2009-2011 гг.

Для повышения содержания подвижного цинка в почве на 1 мг/кг требуется внести 5,8 кг/га цинка (1 мг/кг : 0,171 мг/кг = 5,8 кг). Зная оптимальный уровень содержания цинка в почве можно рассчитать дозы цинка (кг/га) по формуле (8):

$$\Delta = (\mathcal{E}_o - \mathcal{E}_\phi) \cdot 5,8, \quad (8)$$

где \mathcal{E}_o – оптимальный уровень содержания подвижного цинка в почве, мг/кг; \mathcal{E}_ϕ – фактический уровень содержания подвижного цинка в почве, мг/кг; 5,8 – требуется внести цинка для увеличения содержания подвижного цинка на 1 мг/кг в слое почвы 0-30 см, кг/га.

Наивысшая урожайность зерна озимой ржи получена при внесении цинка в дозе 4 кг д.в./га на фоне сбалансированного азотно-фосфорного питания с прибавкой 0,81 т/га по отношению к фону N_{30} , а 0,50 т/га по фону $N_{30}P_{60}$. По формуле (8) можно сделать вывод об оптимальном уровне питания растений цинком (С, мг/кг):

$$C = C_1 + \Delta \cdot b_2 = 0,79 \text{ мг/кг} + 4 \text{ кг} \cdot 0,171 \text{ мг/кг} = 1,474 \approx 1,50 \text{ мг}$$

В процессе исследований выявлено, что применение 1 кг цинка в почву увеличивает его содержание на 0,171 мг/кг и обеспечивает прибавку зерна озимой ржи – 0,125 т/га. Следовательно, для повышения содержания подвижного цинка в почве на 1 мг/кг почвы требуется внести цинка 5,8 кг/га, который повысит урожайность зерна на 0,73 т/га (5,8 кг/га · 0,125 т/га).

Полученные уравнения позволяют выполнить прогноз содержания оптимальных уровней цинка в почве в результате применения удобрений; формирования единицы урожая зерна; доз удобрений с учетом содержания цинка в почве и потребности его для формирования прогнозируемой величины урожая.

На основе определенных параметров возможен расчёт доз с учётом оптимальных уровней (ОУ), который основан на применении формулы (9):

$$\Delta = (\mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_\phi) / b_2. \quad (9)$$

4.3 Нормативные агрохимические показатели для определения потребности озимой ржи в элементах минерального питания. В исследованиях разработаны агрохимические нормативные показатели эффективности применения цинковых удобрений на фоне сбалансированного азотно-фосфорного питания под озимую рожь на лугово-черноземной почве: коэффициенты использования элементов из почвы (КИП – N = 69 %; P₂O₅ = 21 %; Zn = 4,2 %); коэффициенты использования цинка из удобрений (КИУ Zn = 1,1 %); нормы потребления макроэлементов, кг/т: азота – 33, фосфора – 13, калия – 20; микроэлементов, г/т: цинка – 20, меди – 2,5, марганца – 78; количественная характеристика обогащения почвы доступным для растений азотом в процессе онтогенеза – азот текущей нитрификации – N_T = 105 кг/га. Эти показатели используются для расчета доз удобрений на основе почвенной диагностики.

Расчётные дозы цинковых удобрений на основе оптимальных уровней (ОУ) и полевого опыта (ПО) оказали положительное влияние на урожайность озимой ржи (табл. 4).

Таблица 4 – Влияние расчётных доз цинковых удобрений в основное внесение на урожайность зерна озимой ржи на лугово-чернозёмной почве (опыт №3, 2011-2012 гг.)

Варианты	Урожайность, т/га			Прибавка	
	2011 г.	2012 г.	средняя	т/га	% к фону
N ₃₀ P ₆₀ - фон	4,27	4,20	4,24	-	-
Фон + Zn _{3,4} (ОУ)	4,97	4,47	4,72	0,48	11,5
Фон + Zn _{6,6} (ОУ)	4,65	4,48	4,57	0,33	7,78
Фон + Zn _{11,3} (ПО)	4,44	4,32	4,38	0,14	3,30
HCP ₀₅ , т/га	0,36	0,31			

Из изученных методов наилучший – расчёт доз удобрений на основе оптимальных уровней (по формуле 9).

5 Растительная диагностика минерального питания озимой ржи

Для разработки растительной диагностики состояния минерального питания озимой ржи необходимо установление закономерностей действия удобрений на химический состав растений (второй блок РД системы «ПРОД»).

О потребности растений в питательных веществах можно судить по химическому составу растения (Магницкий К.П., 1972; Церлинг В.В., 1990; Ермохин Ю.И., 1995, 2014 и др.).

5.1 Содержание элементов в растениях при применении удобрений.

Выявлен нормативный показатель « b_3 » интенсивности действия каждого внесенного килограмма цинка в почву на содержание его в растениях (0,40 мг/кг), что позволяет определить потребность озимой ржи в цинковых удобрениях (дозы, кг/га) при условии установления оптимальных величин содержания цинка в растениях по фазам роста и развития, используя формулу

(10):

$$\Delta = \frac{(\mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_\Phi)}{b_3 \cdot \mathcal{E}_0}, \quad (10)$$

где: \mathcal{E}_0 и \mathcal{E}_Φ – оптимальное и фактическое содержание цинка в растениях для конкретных фаз роста и развития озимой ржи.

5.2 Оптимальные уровни микроэлементов в растениях и их связь с урожаем. При анализе зависимости между содержанием элементов в растениях и урожаем зерна, в исследованиях установлены оптимальное содержание и соотношение макро- и микроэлементов, характерные для высоких урожаев (табл. 5).

Таблица 5 – Оптимальное содержание и соотношение элементов в растениях озимой ржи в течение вегетации, мг/кг

Фаза развития	Макроэлементы, %			Микроэлементы, мг/кг		
	N	P	K	Zn	Cu	Mn
Оптимальное содержание						
Всходы	4,87±0,67	0,62±0,05	4,00±0,50	17,4±4,0	2,5±0,9	47,0±5,0
Кущение (осень)	4,48±0,64	0,64±0,09	4,52±0,30	12,9±1,5	2,2±1,0	53,7±7,0
Кущение (весна)	3,46±0,40	0,47±0,08	3,50 ±0,42	12,6±0,9	2,2±0,3	65,4±6,0
Выход в трубку	3,20±0,20	0,35±0,03	3,15±0,40	13,2±2,0	2,3±0,4	36,0±4,0
Колошение	2,20±0,40	0,28±0,06	2,25±0,30	12,8±2,0	1,5±0,5	33,0±3,0
Уравнение оптимального баланса						
Всходы	$N=7,8 \cdot P = 1,20 \cdot K$ (11)			$Mn = 2,7 \cdot Zn = 19,0 \cdot Cu$ (16)		
Кущение (осень)	$N=7,0 \cdot P = 0,99 \cdot K$ (12)			$Mn = 4,2 \cdot Zn = 21,0 \cdot Cu$ (17)		
Кущение (весна)	$N=7,4 \cdot P = 0,97 \cdot K$ (13)			$Mn = 5,2 \cdot Zn = 29,7 \cdot Cu$ (18)		
Выход в трубку	$N=9,1 \cdot P = 1,01 \cdot K$ (14)			$Mn = 2,0 \cdot Zn = 15,6 \cdot Cu$ (19)		
Колошение	$N=7,8 \cdot P = 0,98 \cdot K$ (15)			$Mn = 2,6 \cdot Zn = 22,0 \cdot Cu$ (20)		

При внесении возрастающих доз цинковых удобрений наблюдался различный характер питания растений с точки зрения сбалансированности микроэлементами (рис. 1).

В варианте без внесения цинковых удобрений на фоне $N_{30}P_{60}$ содержание цинка, меди и марганца в фазу выхода в трубку было ниже оптимальных уровней: соответственно 10,7; 1,84; 28,0 при оптимумах 13,2; 2,3 и 36,0 мг/кг. При этом в данном варианте сформировалась урожайность, наименьшая в опыте, – 4,24 т/га.

В варианте при внесении максимальной дозы 11,3 кг/га (расчёт доз на основе полевого опыта) наблюдалось заметное увеличение содержания цинка 14,7 мг/кг и марганца (42,5 мг/кг) и уменьшение содержания меди относительно оптимума (1,24 мг/кг, рисунок 1 г), то есть отмечен дисбаланс микроэлементного питания, особенно относительно концентрации меди. В итоге увеличение урожайности составило только 0,14 т/га при значительных затратах цинковых удобрений.

В варианте при расчёте дозы цинка на основе оптимальных уровней при внесении дозы 3,4 кг/га наблюдалось наибольшее соответствие между

фактическим содержанием в растениях (цинка – 12,0; медь – 2,35; марганец – 39) и оптимальным, в результате получен максимальный урожай в опыте 4,74 т/га.

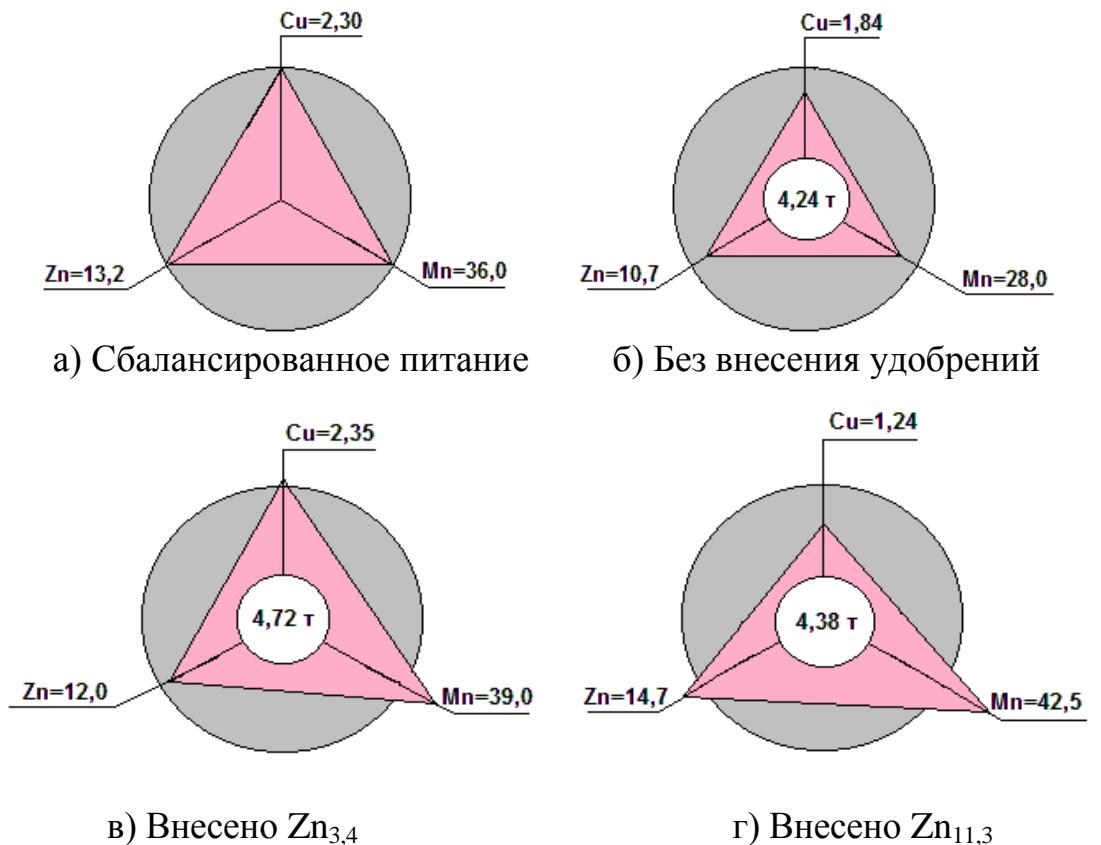


Рисунок 1 – Триадагональные диаграммы зависимости между содержанием микроэлементов растений в фазу выхода в трубку и урожаем озимой ржи (полевой опыт №3, фон N₃₀P₆₀)

Также возможно установить дозы микроэлементов в подкормку по формуле (21) с учетом установленной в исследованиях минимальной нормы потребления элементов питания растением (Н) в определенную фазу развития культуры, выявленной для уровня высоких урожаев (табл. 6), и коэффициента потребности Кп, показывающего отклонение фактического уровня элемента в растении от оптимального:

$$Д = Кп \cdot Н. \quad (21)$$

Таблица 6 – Минимальная норма потребления элементов питания растениями озимой ржи в ранние фазы развития, г/га

Фаза развития	Zn	Cu	Mn
Кущение весенне	35	5	170
Выход в трубку	60	8	220

5.3 Диагностика качества урожая озимой ржи. Для прогнозирования качества растениеводческой продукции (третий блок в системе «ПРОД»), важно установление взаимосвязей и закономерностей действия в системе почва

– растение – удобрение. Математические обработки экспериментальных данных позволили установить зависимость содержания белка, числа падения и цинка в зерне от обеспеченности цинком в ранние фазы развития:

- между дозами цинка (Х) и содержанием белка в зерне (Y_1 – фон N_{30} , Y_2 – фон $N_{30}P_{60}$, % (уравнения 22, 23):

$$Y_1 = 0,228 x + 14,53, r = 0,88, (22); Y_2 = 0,125 x + 14,59, r = 0,94, (23);$$

- между содержанием доступного цинка в почве (Х) и числом падения в зерне (Y_3 – фон N_{30} , Y_4 – фон $N_{30}P_{60}$, сек. (уравнения 24, 25):

$$Y_3 = 25,39 x + 102,6, r = 0,63, (24); Y_4 = 19,53 x + 98,21, r = 0,73, (25);$$

- между содержанием доступного цинка в почве (Х) и цинка в зерне (Y_5 – фон N_{30} , Y_6 – фон $N_{30}P_{60}$, мг/кг (уравнения 26, 27):

$$Y_5 = 0,31 x + 14,55, r = 0,71 (26); Y_6 = 1,68 x + 12,91. r = 0,68 (27)$$

С помощью данных зависимостей возможно на ранних этапах развития прогнозировать качественные показатели зерна озимой ржи.

6 Биоэнергетическая и экономическая эффективность применения удобрений

При применении в основное внесение цинковых удобрений наиболее энергетически эффективно их применение без фосфорных удобрений, так как энергетические затраты при этом относительно невелики при высокой дополнительной энергии в прибавке урожая (биоКПД в варианте Zn_8 – 7,13). Внесение цинка 4 кг на фоне $N_{30}P_{60}$ так же способствовало высокой энергетической эффективности применения удобрений, биоКПД составил 4,08.

При опудривании семян микроэлементами биоКПД применения удобрений $N_{30}P_{60}K_{60}$ под озимую рожь изменялся от 2,14 до 3,75. При этом наивысшей биоэнергетической эффективности удобрения $N_{30}P_{60}K_{60}$ способствовало применение под озимую рожь Cu_{100} и Mn_{50} ; биоКПД составил 3,75.

При расчете экономической эффективности высокий уровень рентабельности получен в варианте с наибольшей прибавкой при основном внесении цинковых удобрений ($N_{30}P_{60} + Zn_4$), чистый доход составил 985 рублей на гектар. Рентабельность в наиболее эффективных вариантах применения микроудобрений способом опудривания составила 45,5-98,6 %.

Заключение

1. В исследованиях 2007-2011 гг. на лугово-черноземной почве в условиях Западной Сибири при изучении влияния различных приемов применения цинковых удобрений на урожайность зерна озимой ржи в условиях лесостепи Западной Сибири, было установлено, что и основное внесение цинковых удобрений и опудривание семян было одинаково высоко эффективно: соответственно дозы 4 кг и 100 г/ц позволили сформировать урожайность 4,72 и 4,79 т/га (прибавка урожая 0,50 и 0,57 т/га).

2. На основе выявленной математической связи между урожайностью зерна озимой ржи и дозами вносимого цинка установлена количественная

характеристика – коэффициент интенсивности действия единицы поступившего элемента на урожайность зерна озимой ржи ($"b_1" = 0,125$ т/га) и на основе этого предложена формула расчета для прогнозирования прибавок урожая зерна и дозы внесения цинка в почву: $\Delta = \frac{P}{b_1}$. Получена формула расчета доз цинковых удобрений под озимую рожь с учетом содержания цинка в почве: $\Delta_{Zn} = \frac{2,32}{C_{Zn}}$.

3. Установлен коэффициент интенсивности действия единицы цинка, внесенного в почву (кг д.в./га), на содержание подвижного цинка в почве ($"b_2" = 0,171$ мг/кг), который позволяет сделать ориентировочный прогноз накопления элемента и создавать его оптимальный уровень в почве (мг/кг) по формуле: $C = C_1 + \Delta \cdot b_2$.

4. Определены наиболее эффективные дозы микроэлементов для предпосевной обработки семян (опудривания) озимой ржи. На оптимальном азотно-фосфорно-калийном фоне при применении цинка максимальная урожайность наблюдалась при дозе 100 г/ц и составила 4,84 т/га (прибавка 11,01 % к контролю); меди – 100 г/ц – 4,73 т/га (8,49 %); марганца – 50 г/ц – 4,86 т/га (11,47 %).

5. Разработаны агрохимические нормативные показатели эффективности применения цинковых удобрений на фоне сбалансированного азотно-фосфорного питания под озимую рожь на лугово-черноземной почве: коэффициенты использования элементов из почвы (КИП – N = 69 %; P₂O₅ = 21 %; Zn = 4,2 %); коэффициенты использования цинка из удобрений (КИУ Zn = 1,1 %); нормы потребления макроэлементов, кг/т: азота – 33, фосфора – 13, калия – 20; микроэлементов, г/т: цинка – 20, меди – 2,5, марганца – 78; количественная характеристика обогащения почвы доступным для растений азотом в процессе онтогенеза – азот текущей нитрификации – N_T = 105 кг/га; коэффициент интенсивности действия поступившего в почву цинка на химический состав озимой ржи ($"b_3" = 0,40$ мг/кг сухого вещества).

6. Разработаны основные параметры почвенной и растительной диагностики озимой ржи, характеризующие оптимальные уровни питания для получения высоких урожаев зерна в количественном и качественном отношении: в почве содержание подвижного цинка; в растениях – содержание и соотношение азота, фосфора, калия, цинка, меди и марганца в определенные фазы онтогенеза.

7. Применение цинковых удобрений под озимую рожь способствует формированию качественной продукции. Выявлены функциональные зависимости между содержанием цинка в почве, дозами цинковых удобрений и числом падения, содержанием белка и цинка в зерне озимой ржи, которые позволяют по уравнениям (22-27) прогнозировать качественные показатели.

8. Установлена высокая биоэнергетическая эффективность применения цинковых удобрений в основное внесение в дозе 4 кг на фоне азотного-

фосфорного минерального удобрения ($\eta = 4,08$). Биоэнергетический КПД при обработке семян Zn_{100} составил 3,72 ед., при опудривании Cu_{100} и Mn_{50} – 3,75 ед.

9. Полученный уровень рентабельности показал, что применение микроудобрений под озимую рожь экономически выгодно. Высокий уровень рентабельности получен в варианте с наибольшей прибавкой при основном внесении цинковых удобрений ($N_{30}P_{60} + Zn_4$): чистый доход составил 985 рублей на гектар. Рентабельность в наиболее эффективных вариантах применения микроудобрений способом опудривания (Zn_{100} , Cu_{100} , Mn_{50}) составила 45,5-98,6 %.

Предложения производству

На лугово-черноземных почвах Омского Прииртышья микроудобрения при возделывании озимой ржи следует применять на основе разработанных нормативных показателей комплексного метода почвенно-растительной оперативной диагностики (система «ПРОД»):

а) оптимального содержание подвижного цинка в слое почвы 0-30 см до посева – 1,50 мг/кг;

б) коэффициентов использования элементов питания из почвы и удобрений, нормативов потребления макро- и микроэлементов для получения 1 т урожая основной продукции с соответствующим количеством побочной;

в) оптимальных уровней содержания и соотношения макро- и микроэлементов в растениях в основные фазы развития (таблица 5);

г) коэффициентов действия удобрений « b_2 » на химический состав почвы ($Zn = 0,171$ мг/кг почвы) и химический состав растений культуры « b_3 » ($Zn = 0,40$ мг/кг сухого вещества).

Для расчета доз и сочетания удобрений использовать формулы расчета доз удобрений в основное внесение с учетом химического анализа почвы:

$$D = \frac{\mathcal{E}_o - \mathcal{E}\phi}{b}, D_{\Pi} = \frac{D_o \cdot X_o}{X_{\Pi}};$$

- в подкормку на основе растительной диагностики:

$$D = K_{\Pi} \cdot N_i D = \frac{(\mathcal{E}_o - \mathcal{E}\phi)^2}{b \cdot \mathcal{E}_o}.$$

При применении микроудобрений способом опудривания при недостатке микроэлемента в почве использовать дозы Zn_{100} , Cu_{100} и Mn_{50} .

Использование в производстве рекомендуемых нормативных агрохимических показателей и формул расчета доз удобрений для основного и дополнительного внесения позволит получать максимальный экономически обоснованный урожай озимой ржи хорошего качества.

Список работ, опубликованных по теме диссертации Статьи в научных журналах, рекомендуемых ВАК РФ:

1. **Болдышева Е.П.** Эффективность применения микроудобрений под озимую рожь на лугово-чернозёмной почве Западной Сибири / Е.П. Болдышева // Вестник Бурятской сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. – 2011. – № 4. – С. 66-71.

2. Попова В.И. Биоэнергетическая эффективность применения удобрений под озимые зерновые культуры в Западной Сибири / В.И. Попова, Е.П. **Болдышева** // Вестник Алтайского государственного аграрного ун-та. – 2011. – № 10. – С. 10-15.
3. Эффективность основного внесения цинковых удобрений под озимые зерновые культуры на лугово-черноземной почве Западной Сибири / И.А. Бобренко, Н.В. Гоман, В.И. Попова, Е.П. **Болдышева** // Омский научный вестник. – 2011. – № 1 (104). – С. 246-250.
4. **Болдышева Е.П.** Эффективность обработки семян медью, цинком и марганцем при возделывании озимой ржи на лугово-чернозёмной почве в условиях Западной Сибири / Е.П. **Болдышева**, И.А. Бобренко, Н.В. Гоман // Омский научный вестник. – 2015. – №1(138). – С. 142-144.

Публикации в рецензируемых журналах и материалах конференций:

5. **Болдышева Е.П.** Оптимизация применения цинковых удобрений под озимые зерновые культуры на лугово-черноземной почве Омского Прииртышья / Е.П. **Болдышева**, В.И. Попова, Н.В. Михальская // Новейшие направления развития аграрной науки в работах молодых учёных: сб. мат. IV Междунар. науч. конф. молодых учёных (22-23 апреля 2010 г., пос. Краснообск) / Рос. акад. с.-х. наук. Сиб. регион.отд-ние: в 2 ч. – Новосибирск, 2010. – Ч. 1. – С. 34-37.
6. **Болдышева Е.П.** Эффективность основного внесения цинковых удобрений под озимые зерновые культуры на лугово-черноземной почве / Е.П. **Болдышева**, В.И. Попова, Н.В. Гоман, И.А. Бобренко // Диагностика и управление минеральным питанием растений: сб. мат. Междунар. науч.-практич. конф. – Омск: Вариант-Омск, 2010. – С. 35-45.
7. **Болдышева Е.П.** Биоэнергетическая эффективность различных технологий применения удобрений под озимую рожь в Западной Сибири / Е.П. **Болдышева**, Н.В. Гоман, И.А. Бобренко // Проблемы безопасности. Технологии и управление: сб. мат. науч.-практич. конф. – Омск, 2012. – С. 29-36.
8. **Болдышева Е.П.** Оптимизация применения цинковых удобрений при возделывании озимой ржи в Западной Сибири / Е.П. **Болдышева** // Инновационные разработки молодых учёных – развитию агропромышленного комплекса: сб. мат. II Междунар. конф. – ГНУ СНИИЖК, Ставрополь, 2013. – Т. 3. – Вып. 6. – С. 36-40.
9. **Болдышева Е.П.** Эффективность обработки семян микроэлементами при возделывании озимой ржи / Е.П. **Болдышева**, И.А. Бобренко, Н.В. Гоман // Инновационные разработки молодых учёных – развитию агропромышленного комплекса: сб. мат. III Междунар. конф. – ГНУ СНИИЖК, Ставрополь, 2014. – Т. 2. – Вып. 7. – С.15-18.
10. **Болдышева Е.П.** Биоэнергетическая и экономическая эффективность применения макро- и микроудобрений при возделывании озимой ржи в условиях лесостепи Западной Сибири / Е.П. **Болдышева**, И.А. Бобренко, Н.В. Гоман // Агрометеорология и сельское хозяйство: история, значение и перспективы: сб. мат. Национальной (Всероссийской) науч.-практич. конф., посвящ. 100-летнему юбилею со дня образования учебной лаборатории Агрометеорологии ФГБОУ ВО Омский ГАУ. – Омск: ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2016. – С. 157-161.
11. Бобренко И.А. Содержание микроэлементов в растениях озимой ржи при применении цинковых удобрений в условиях Западной Сибири / И.А. Бобренко, Е.П. **Болдышева**, Н.В. Гоман // Перспективы производства продуктов питания нового поколения: сб. мат. Всерос. науч.-практич. конф. с международным участием (13-14 апреля 2017 г.). – Омск: Изд-во ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2017. – С. 191-194.
12. Бобренко И.А. Метод диагностики потребности озимой ржи в цинковых удобрениях на основе полевого опыта / И.А. Бобренко, Е.П. **Болдышева**, Н.В. Гоман // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2017. – №2 (9). – С. 5.