

РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНОГО И ПРАКТИЧЕСКОГО ОСВОЕНИЯ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ В ПОЛЕВОМ ОПЫТЕ

А.И. Беленков, д.с.-х.н.,

ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса»,

М.А. Мазиров, д.б.н., М.А. Воронов,

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

141055, ул. Научный городок, корп. 1, Лобня, Московская обл., Россия

E-mail: belenokaleksis@mail.ru

127434, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, Россия

E-mail: mazirov@mail.ru; mvoronov97@gmail.com

Обобщаются и резюмируются результаты внедрения и освоения принципов технологии точного земледелия на базе Центра точного земледелия (ЦТЗ), созданного в Российском государственном аграрном университете – МСХА имени К.А. Тимирязева для подготовки нового поколения специалистов аграрного профиля. По итогам многолетних исследований определены оптимальная конструкция посевов и посадок сельскохозяйственных культур, азотный статус посевов озимой пшеницы для проведения своевременной и качественной подкормки. Намечены пути совершенствования системы применения гербицидов и возможности их дифференцированного внесения. Проведена оценка содержания элементов питания почвы каждого участка поля, в результате отбора почвенных проб, с целью формирования карты плодородия. Представлены урожайные данные по культурам зернопропашного севооборота, при этом можно отметить тенденцию к превышению урожайности с.-х. культур по точной технологии в сравнении с традиционной. Приведены данные за две ротации опытного севооборота по урожайности с.-х. культур при различных приемах обработки. Установлено, что первоначально для озимой пшеницы лучше зарекомендовал себя прямой посев, опережая вспашку в среднем на 0,27 т/га. Картофель лучше отзывался на отвальную обработку, превосходя минимальную на 1,1-2,2 т/га. На ячмене существенной разницы между обработками не обнаружено.

Ключевые слова: полевой опыт, технология, точная, традиционная, отвальная, минимальная, нулевая обработки почвы, удобрения, гербициды, урожайность культур.

Для цитирования: Беленков А.И., Мазиров М.А., Воронов М.А. Результаты научного и практического освоения точного земледелия в полевом опыте// Плодородие. – 2025. – №1. – С. 31-41. DOI: 10.25680/S19948603.2025.142.08.

Одно из наиболее перспективных направлений развития современной обработки почвы – точное земледелие, получившее широкое распространение в мире, в последние два десятилетия активно апробируемое в России. В основе научной концепции точного земледелия лежит представление о наличии неоднородностей в пределах одного поля. Для их оценки используют новейшие технологии – системы глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС), специальные датчики, аэрофотоснимки и снимки со спутников и беспилотников, специальные программы для агроменеджмента на базе геоинформационных систем (ГИС). Данные используются для более точной и качественной оценки оптимумов конструкции посевов, расчёта доз внесения удобрений и норм средств защиты растений (СЗР), более точного планирования урожайности. Предлагаемая концепция обязательно должна учитывать локальные особенности почвы, климатические условия региона [1]. Точное земледелие рассматривает каждое поле с неоднородными по рельефу, почвенному покрову, агрохимическому содержанию признаками и свойствами, подразумевает применение на каждом участке разных технологий выращивания сельскохозяйственных культур [1].

Точное земледелие внедряется путем постепенного освоения качественно новых агротехнологий на основе высокоэффективных и экологически безопасных технических и агрохимических средств. Применение точного земледелия позволяет резко повысить урожайность сельскохозяйственных культур, улучшить качество продукции, сократить затраты, снизить воздействие

механизмов, удобрений и гербицидов на окружающую среду [2].

Под точным земледелием понимают «совокупность технологических приемов для целенаправленной дифференцированной обработки отдельных частей поля с учетом мелкомасштабных особенностей природных условий для создания наиболее благоприятных условий роста и развития культурных растений в связи с неоднородностью поля по плодородию, распространению вредителей, болезней и сорняков, на основе концентрации технологических операций в пространстве, в оптимальные сроки и при рациональной дозировке с целью создать основу для экономически эффективного и экологически обоснованного землепользования» [3].

Преимущества точного земледелия:

- рациональное использование средств производства, которое даёт больше прибыли, количество вносимого удобрения зависит от потребности растений, производитель экономит там, где достаточно питательных элементов в почве и повышает дозу там, где есть потребность в них;

- растениеводство становится ресурсосберегающим и не ухудшает состояние окружающей среды, выдерживаются экологические нормы и ограничения без обусловленных потерь качества и прибыли;

- благодаря достоверному документированию всех процессов производства облегчается взаимодействие с различными службами и организациями [9].

Современные технологии земледелия направлены на сбережение, улучшение и повышение эффективности

использования природных ресурсов за счет интегрированного подхода к существующим почвенным, биологическим, водным ресурсам и расходным материалам. На практике установлено, что, чем продолжительнее период применения берегающих технологий, тем здоровее и производительнее становятся сельскохозяйственные экосистемы.

В 2007 г. в соответствии с реализацией инновационной образовательной программы «Формирование инновационной образовательной среды в Российском государственном аграрном университете – МСХА имени

К.А. Тимирязева для подготовки нового поколения специалистов аграрного профиля» был образован Центр точного земледелия (ЦТЗ). Цель его создания – организация и осуществление учебной, научно-исследовательской и просветительской деятельности на основе использования современных агротехнологий и принципов точного земледелия [4, 5].

На опытном поле университета на территории Полевой опытной станции РГАУ-МСХА заложили стационарный опыт общей площадью около 6 га (рис. 1).



Рис. 1. Вид из космоса на поля Центра точного земледелия РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Главная цель деятельности Центра точного земледелия РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева — обучение студентов технологиям точного земледелия, повышение квалификации преподавательского состава, специалистов сельскохозяйственных предприятий, внедрение разработанных учеными университета элементов технологий точного земледелия, пропаганда передовых агротехнологий в области адаптивно-ландшафтного земледелия. На базе центра проводились исследования по разработке сортовой агротехники высокопродуктивных сортов полевых культур, способов и приемов энергосберегающих и почвозащитных обработок, эффективных способов посева, приемов ухода, уборки урожая с использованием современной техники, оборудованной системой GPS. Велась разработка высокоэффективных экологически безопасных систем защиты растений. Все эти направления позволили выполнять дипломные, магистерские и диссертационные работы студентами и аспирантами различных институтов и факультетов [13].

Методика. Основой полевого опыта являлся четырехпольный зернопропашной севооборот с чередованием культур: 1 – викоовсяная смесь на корм; 2 – озимая пшеница с пожнивным посевом горчицы на сидерат; 3 – картофель; 4 – ячмень. В опыте изучались две технологии возделывания с.-х. культур (традиционная и точная), по два приема основной обработки почвы – отвальная и нулевая (прямой посев) под вику с овсом и озимую пшеницу, отвальная и минимальная под картофель и ячмень.

Различие между технологиями заключалось, в том числе, в применении разных подходов к проведению посева и посадки. В наших исследованиях посев зерновых культур (озимой пшеницы и ячменя) и посадка картофеля проводились при традиционной технологии – по маркеру, при точной – по автопилоту с использованием

системы GPS. Посев озимой пшеницы и ячменя на отвальном фоне осуществляли сеялкой точного высева Д-9-30. При нулевой обработке почвы посев викоовсяной смеси и озимой пшеницы проводили пневматической сеялкой ДМС-3 с использованием автопилота. Маркер на этой сеялке использовать не удалось из-за конструктивных и технических недоработок. Посев ячменя на минимальном фоне осуществляли сеялкой Д-9-30. Посадку картофеля проводили картофелесажалкой GL-34Т с использованием маркера и автопилота. В опыте отвальную обработку выполняли оборотным плугом Eur Oral на 20-22 см, минимальную – комбинированным агрегатом Regasus на 12-14 см. Нулевой вариант представлял собой фон без обработки почвы (прямой посев).

Под культуры полевого севооборота в опыте перед посевом применяли сплошное внесение комплексных минеральных удобрений: под викоовсяную смесь – 200 кг/га, озимую пшеницу и ячмень – 300, перед посадкой картофеля – 1000 кг/га. Под озимую пшеницу 2 раза за вегетацию использовали подкормку аммиачной селитрой, в случае традиционного земледелия по 70 кг/га, точного – дифференцированно с учетом текущего состояния растений.

При применении гербицидов в борьбе с сорняками в посевах зерновых различали два варианта – сплошная обработка и дифференцированная, проводимая в зависимости от наличия и обилия сорных растений.

В данной статье представлена информация за период с 2009 по 2016 г., т.е. времени, наиболее полного и реального выполнения в опыте элементов точного земледелия.

Результаты и их обсуждение. В период исследований агроклиматические условия складывались по-разному (табл. 1).

1. Метеоусловия периода вегетации с.-х. культур (апрель-август) (по данным метеостанции имени В.А. Михельсона)

Показатель		Годы							
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Температура воздуха, °С	годовая	14,3	18,7	15,6	16,0	16,2	16,0	14,9	16,4
	среднег. разни́ца (±)	14,2							
	разни́ца (±)	+0,1	+4,5	+1,4	+1,8	+2,0	+1,8	+0,7	+2,2
Количество осадков, мм	годовое	313	202	246	343	421	238	377	399
	среднег.	332,0							
	разни́ца (±)	-19	-130	-86	+11	+89	-94	+45	+67
Оценка периода по метеоусловиям года		Благ.	Небл.	Небл.	Благ.	Благ.	Сред.	Благ.	Благ.

Примечание. Благ. – благоприятный период, сред. – средний, небл. – неблагоприятный.

При сопоставлении ежегодных метеопоказателей температуры воздуха и количества осадков за период активной вегетации с.-х. культур со среднег. значениями можно дать следующую оценку периода. К благоприятным годам из 8 следовало отнести 5 (2009, 2012, 2013, 2015 и 2016 г.). Здесь просматривались достаточно умеренная температура воздуха и сравнительно обильное количество выпавших осадков. 2014 г. оказался средним, 2010 и 2011 г. – неблагоприятными по комплексу метеоусловий.

Важной составной частью технологии являются способ и качество посева культур. Оценочным показателем служила величина смежного стыкового междурядья между встречными проходами агрегата (табл. 2).

В опыте, в среднем за период исследований, при использовании маркера по традиционной технологии возделывания на отвальном фоне отмечалась ширина стыковых междурядий, превышающая таковую при точной технологии. Параметры стыковых междурядий при точной технологии по всем культурам соответствовали агротребованиям по данному агроприему: не более ± 2,5 см. То же характерно для нулевой обработки при

использовании сеялки ДМС для посева вики с овсом и озимой пшеницы.

2. Ширина стыковых междурядий и отклонение от стандартной величины междурядий сеялки (в среднем за период)

Культура	Сеялка Д-9-30 (отвальный фон)				ДМС (нулевой фон)	
	По маркеру		Автопилот		Автопилот	
	ширина стыкового междурядья, см	отклонение, см	ширина стыкового междурядья, см	отклонение, см	ширина стыкового междурядья, см	отклонение, см
Ячмень	15,1	+3,1	13,4	+1,4	12,7*	+0,7
Вика+ овес	-	-	12,3	+0,3	19,1	+0,3
Оз. пшеница	16,8	+4,8	13,8	+1,8	19,2	+0,4

Примечания. 1. Ширина междурядий сеялок: Д-9-30 – 12 см, ДМС – 18,8 см. 2. Ячмень на минимальном фоне высевали сеялкой Д-9-30 со стандартным междурядьем 12 см.

На рисунке 2 показан внешний вид посевов ячменя разными способами.



Рис. 2. Виды посева ячменя: по маркеру (слева) и по автопилоту (справа)

Аналогично осуществляли посадку и гребнеобразование картофеля – с использованием маркера и автопилота в системе точного земледелия. В таблице 3 представлены данные за 3 года исследований в опыте ЦТЗ [6].

3. Ширина смежных междурядий и расположение растений картофеля на гребне при различных технологиях возделывания

Год	Ширина смежных междурядий при посадке, см		Расположение растений на гребне от центра, см	
	маркер	автопилот	маркер	автопилот
2009	от 65 до 81	75 ± 2,8	± 6-10	± 2,8
2010	от 60 до 80	75 ± 3,3	± 5-15	± 3,3
2011	от 70 до 90	75 ± 1,5	± 5-15	± 1,5
Среднее	от 65 до 83	75 ± 2,5	± 5-13	± 2,5

В среднем за период ширина смежных междурядий между проходами картофелесажалки по маркеру

составила 65-83 см. При использовании автопилота среднее отклонение от стандартного междурядья 75 см находилось в пределах 2,5 см. Соответственно растения картофеля на гребне после проведения гребнеобразования располагались с отклонениями от центра на традиционной технологии ±5-13 см, на точной – ± 2,5 см. При посадке по маркеру происходили односторонние изменения нарастания вегетативной части растений в ту или иную сторону, обнаруживалась неравномерность в образовании и развитии подземных клубней. Это, безусловно, оказывало нежелательное влияние на урожайность картофеля с формированием большого количества мелкой и средней фракций (рис. 3).

При выполнении технологии точного земледелия растения картофеля располагались практически по центру рядка (рис. 4).



а



б

Рис. 3. Возможные визуальные погрешности гребнеобразования картофеля без применения автопилота:
а - сужение гребня, *б* - отклонение от центра



Рис. 4. Посадка картофеля и гребнеобразование по автопилоту

Точность проведения гребнеобразования оценивали по отклонению всходов картофеля от центра гребня. В современных технологиях гребнеобразование проводилось до появления всходов, от точности наложения проходов при посадке и гребнеобразовании зависят количество и качество произведенной продукции с учетом расстояния центра рядка от центра гребня, независимо от технологии и приема обработки почвы, были выделены пять групп отклонений.

В 1-й группе отклонение составляет, 0-2 см, во 2-й – 3-5, в 3-й – 6-8, в 4-й 9-11, в 5-й 12-14 см.

Затем было рассчитано распределение отклонений по группам при разных способах возделывания картофеля (табл. 4).

4. Распределение отклонений по группам, %

Группа отклонений	Вариант опыта			
	Автопилот / минимальная	Автопилот / отвальная	Маркер / минимальная	Маркер / отвальная
1	34	51	13	18
2	47	33	33	18
3	18	5	27	23
4*	0	8	17	24
5*	0	1	9	16

*Данные отклонения рядка от центра гребня существенно снижают урожайность картофеля.

На основе анализа данных среднего значения отклонений можно констатировать, что способ движения машинно-тракторных агрегатов по автопилоту более выровненный по траектории в условиях как минимально обработанной, так и отвальной обработанной почвы. Во втором случае отклонения были минимальными.

Средние значения отклонений растений картофеля от центра гребня измерены для каждой технологии в 46

точках, затем вычислены средние значения для технологии (табл. 5).

5. Средние значения отклонений растений картофеля от центра гребня, см

Система обработки почвы	Способ движения	
	По автопилоту	По маркеру
Минимальная	3,6±0,39	6,3±0,74
Отвальная	3,3±0,62	7,1±0,86

Таким образом, способ движения сельхозтехники по автопилоту показал себя достаточно хорошо, как и в условиях различных обработок почвы. Как видно, отклонения по маркеру и автопилоту входят в разные группы: в третью и вторую соответственно. Механизатору для изменения курса движения агрегата при отклонении от заданной траектории необходимо визуально обнаружить это отклонение, которое должно быть достаточно большим чтобы его можно было заметить. Автопилот, используя точные данные о своем местоположении, способен реагировать на незначительные отклонения и корректировать траекторию. Отклонения от заданной траектории движения трактора приводят к неэффективному использованию посевной площади поля (пропуски, перекрытия). Предварительные результаты оценки влияния отклонений на потери площадей представлены в таблице 6.

6. Потери площадей при различных способах обработки почвы и движения машинно-тракторных агрегатов

Способ движения и обработки почвы	Отклонение стыкового междурядья от нормы, м	Потеря площади на 1 га, га
По маркеру, отвальная	0,022	0,0073
По маркеру, минимальная	0,026	0,0086
По автопилоту, отвальная	0,001	0,0003
По автопилоту, минимальная	-0,001	-0,0003

Увеличение стыковых междурядий приводит к росту свободных площадей между проходами, которые потенциально можно было бы занять под картофель. Использование автопилота показало высокую точность как на минимальной, так и на отвальной обработках. Помимо снижения эффективности использования полезной площади полей, отклонения при проходе агрегатов

приводят к смещению рядков относительно гребней, что может существенно снижать урожайность и товарность картофеля.

В полевом опыте получены результаты, на основании которых можно сделать предварительные выводы о влиянии обработки почвы и возможных отклонений на урожайность (рис. 5) и фракционный состав картофеля.

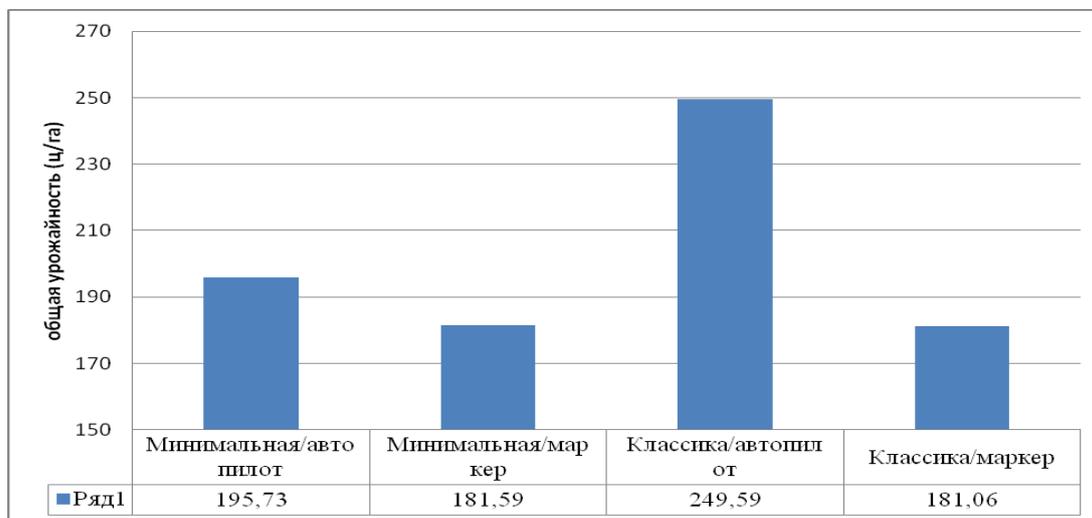


Рис. 5. Урожайность картофеля по вариантам опыта

Изучение фракционного состава проводили на делянках, заложенных в разных местах поля, в варианте как вспашки, так и минимальной обработки. Данные по фракционному анализу для минимальной и отвальной обработок представлены в таблице 7 и на рисунке 6.

Снижение урожайности картофеля при увеличении величины отклонений хорошо описывается линейным уравнением (рис. 7). Достоверность аппроксимации линейным уравнением очень высокая (коэффициент детерминации $R^2=0,87$). Однако при анализе выделяются две области точек. Первая область точек относится к небольшим отклонениям (2-6%), в этой области урожайность практически не отличалась от мест с нулевым отклонением рядков от центра гребня. При увеличении размера отклонений на 10-15% урожайность снижалась на 30%. При еще большем отклонении (до 20%) урожайность уменьшалась на 40%. В вариантах с применением автопилота критические, т.е. существенно снижающие урожайность, отклонения от центра рядка встречались не чаще чем в 9% случаев, тогда как при применении

маркера критические отклонения отмечались на поле гораздо чаще – до 40% случаев.

7. Данные фракционного состава урожая картофеля по группам отклонений при минимальной и отвальной обработках почвы

Группа отклонений	Обработка почвы	Семенная фракция, 30-60 мм, кг	Фуражная фракция, <30 мм, кг	Продовольственная фракция, >60 мм, кг	Продуктивность, кг/делянка
1	Минимальная	6,52±0,21	0,44±0,19	0,68±0,11	7,64±0,50
	Отвальная	7,85±0,33	0,3±0,17	1,56±0,47	9,71±0,68
2	Минимальная	6,23±0,31	0,39±0,21	0,71±0,31	7,34±0,31
	Отвальная	7,65±0,60	0,16±0,07	1,55±0,29	9,36±0,90
3	Минимальная	5,76±0,66	0,31±0,17	0,75±0,25	6,81±0,86
	Отвальная	5,75±0,60	0,19±0,01	0,86±0,03	6,79±0,70
4	Минимальная	6,00±0,17	0,25±0,09	0,61±0,11	6,86±0,05
	Отвальная	6,10±1,09	0,41±0,21	0,64±0,76	7,15±0,60
5	Минимальная	5,82±0,15	0,29±0,15	0,21±0,07	6,32±0,19
	Отвальная	5,11±0,33	0,37±0,07	0,38±0,31	5,86±0,60

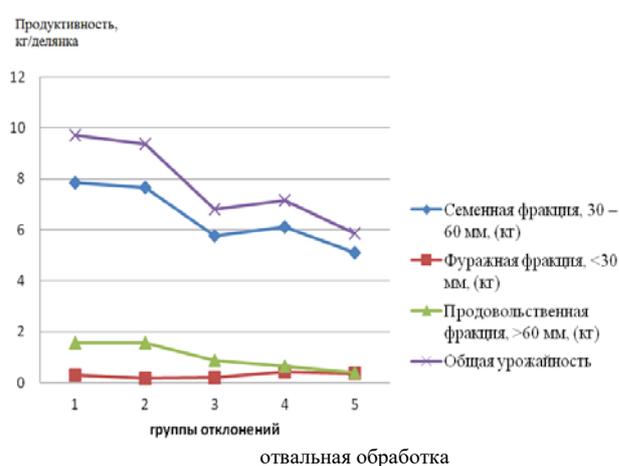
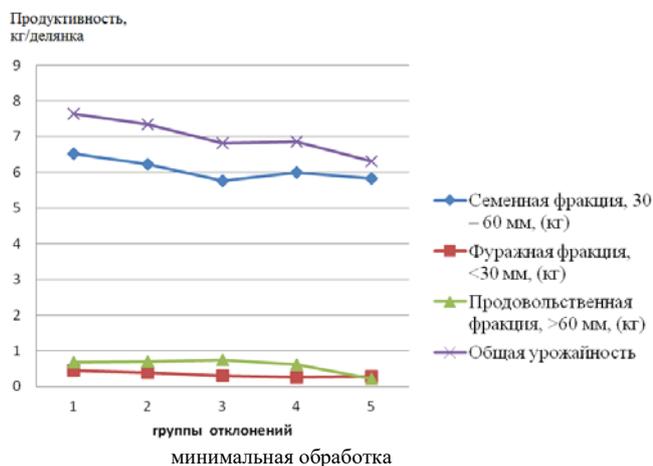


Рис. 6. Фракционный состав и общая продуктивность картофеля в вариантах минимальной и отвальной обработок почвы при разной степени отклонений рядка от центра гребня

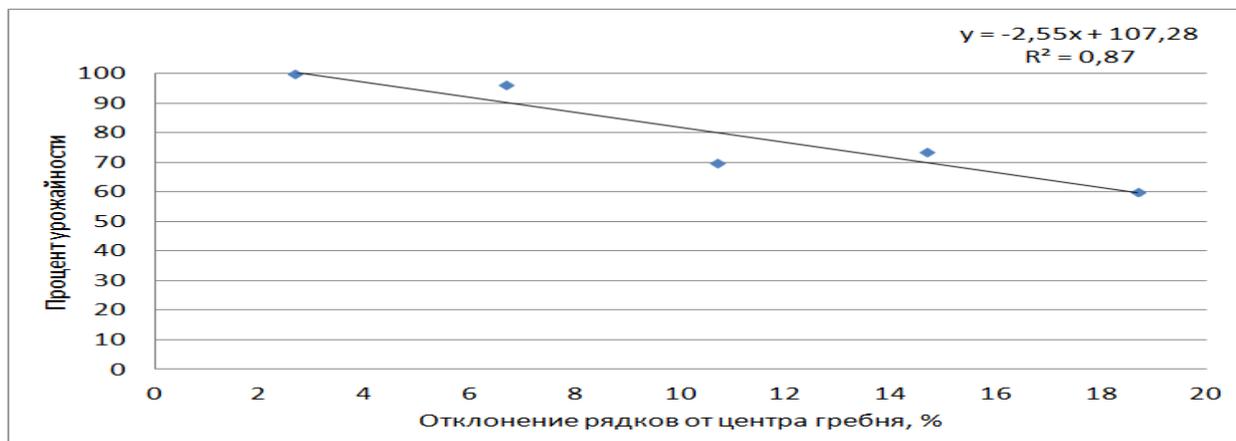


Рис. 7. Снижение урожайности картофеля (%) при повышении значений отклонения рядка от центра гребня

Следовательно, за счет использования автопилота в точном земледелии можно повысить урожайность картофеля на 30% при высоком качестве продукции.



Рис. 8. Система RT-200 Green Seeker в работе

Информация, получаемая при использовании указанных приборов, представлялась в виде электронных карт, обрабатываемых при помощи компьютерной программы SMS Advanced и представляемой в виде ГИС (геоинформационной системы).

Особенно важно использование сенсорных датчиков при внесении азотных удобрений в виде подборок, которые являются решающим фактором получения высоких урожаев и улучшения качества продукции. Равномерное по площади поля внесение удобрений при неоднородном составе питательных веществ в почве приводит к их локальной передозировке или недостаточности. Удобрения необходимо вносить в соответствии с потребностями растений для оптимального их использования. Дифференциальное внесение минеральных удобрений – одно из важнейших экономических и экологических положений точного земледелия. Использование данной технологии позволяет значительно сократить затраты на применение удобрений, т.е. вносить их в зависимости от потребности культурных растений, что обеспечивает оптимальное содержание питательных веществ в почве [7].

В течение нескольких вегетационных сезонов сотрудники Центра точного земледелия периодически обследовали поля озимой пшеницы с помощью приборов Green

Seeker RT 200, N-tester и N-sensor ALS. В опыте Центра точного земледелия для сканирования посевов сельскохозяйственных культур использовали оптический датчик RT-200 Green Seeker (США) (рис. 8) и N-Sensor ALS (Германия) (рис.9).



Рис. 9. Работа системы N-Sensor ALS с машиной для внесения удобрений

Seeker RT 200, N-tester и N-sensor ALS. Главная цель обследований – оценить азотный статус озимой пшеницы для проведения своевременной подкормки азотом. Для формирования урожая высокого качества был разработан алгоритм дифференцированного внесения азотных удобрений на основе карт биомассы, построенных с помощью оптических датчиков с применением навигационных систем. На поле опыта ЦТЗ в течение вегетационного сезона 2011 г. проводили исследования биомассы пшеницы во время вегетации. Во второй половине апреля, в период отрастания растений после зимы, отмечалась большая неоднородность посевов, связанная с неравномерностью после перезимовки, применением разных технологий и неоднородностью почвенных свойств (рис. 10).

В варианте со вспашкой растения перезимовали лучше (зеленые контуры на карте). По краям поля обнаружился краевой эффект, красными цветом показаны места, где посевы были изреженными и слабыми. Первая подкормка озимой пшеницы аммиачной селитрой была проведена 28 апреля 2011 г. в режиме on-line с одновременным снятием показаний биомассы культуры и представлена на рисунке 11.

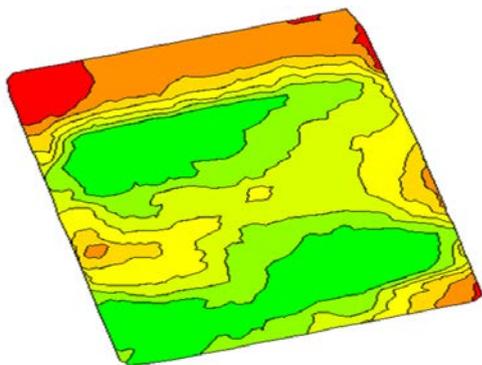


Рис. 10. Карта распределения NDVI посевов пшеницы в опыте ЦТЗ биомассы озимой пшеницы от 28 апреля 2011 г. (Информация получена с помощью прибора программы SMS Advanced)

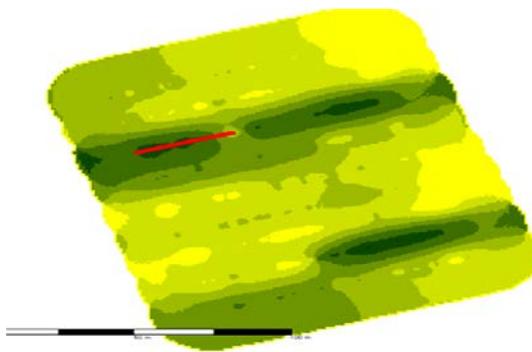


Рис. 11. Карта распределения (Информация получена и построена с Seeker@RT200, карта построена с помощью прибора N-sensor@ ALS Yara)

При сравнении карт на рисунках 10 и 11 видно совпадение контуров. Для прибора GreenSeeker, используемого в нашем исследовании в ручном режиме, сетка опробования составляла примерно $1,5 \times 3$ м, для прибора N-sensor, монтируемого на крыше трактора, ширина захвата составляла 12–15 м. На рисунке 11 красной линией показана область посева, где проводили калибровку дозы внесения аммиачной селитры. Для калибровки

выбирали участок поля с хорошо развитым и равномерным посевом. Для такого участка предоставлялось стандартное предписание на внесение определенной дозы удобрений [20].

Разработанный алгоритм внесения азотных удобрений в фазе выхода в трубку (ЕС 30–36) приведен на рисунке 12.



Рис. 12. Алгоритм внесения азотных удобрений на озимой пшенице в фазе выхода в трубку (ЕС 30–36)

Согласно данному алгоритму, при снижении биомассы посева ниже средней, доза вносимых удобрений увеличивалась, что должно привести к выравниванию биомассы посевов. Но в то же время, если биомасса посева в какой-либо части поля снижалась до определенного критически низкого значения, то удобрение здесь давали в минимальной дозе или не вносили совсем. Таким образом, этот алгоритм предлагает три сценария применения удобрений: 1 – внесение повышенных доз для выравнивания отстающих в развитии посевов, 2 – внесение средних доз для нормально развитых посевов и 3 – внесение минимальных (нулевых) доз для выбракованных частей поля, где состояние посевов неудовлетворительное.

Помимо картограммы распределения почвенных свойств, в точном земледелии необходимо использовать картографирование биомассы посевов в различные фазы вегетации в режиме реального времени. Такие исследования проводили в различных целях. Во-первых, по состоянию посевов в начале вегетации можно дать прогноз урожайности. Во-вторых, оперативное обследование посевов в определенные фазы развития служило обоснованием для внесения определенных доз удобрений в виде

подкормки. В-третьих, обследование посевов в конце вегетации и дробный учет урожайности позволяют сделать вывод о неоднородности почвенных свойств и выделить на поле контуры для дополнительного исследования. Таким образом, по картам биомассы, составленным в разные сроки вегетации, можно получить дополнительную информацию о состоянии культуры и о свойствах почвы. Карты биомассы также имеют геопривязку, что позволяет наложить несколько «слоев» карт друг на друга и проследить сезонную или многолетнюю динамику изменения биомассы, вызванную метеоусловиями, внесением удобрений и проведением других агротехнических мероприятий. Некоторые стабильные свойства почвы накладывают на карту биомассы постоянный отпечаток, по которому можно выделить место на поле с целью особой обработки или выбраковки. Например, если в одном углу поля биомасса в любой момент обследования будет ниже, чем на соседних участках, независимо от внесения удобрений и проведения технологических операций, следует более подробно исследовать почвенные и иные свойства этого участка, найти причину постоянного недобора биомассы и урожая в этом месте. Если плодородие почвы на данном участке восстановить

невозможно, необходимо снизить дозу внесения удобрений или полностью выбраковать его – в противном случае использование этого участка может оказаться экономически убыточным (рис. 13).

В нашем опыте стандартная доза удобрений в варианте традиционного земледелия по всей площади поля составляла 70 кг д.в/га азота (в виде аммиачной

селитры). В варианте точного земледелия дозы азота в подкормке изменялись в зависимости от состояния биомассы. Доза 65–70 кг/га была внесена на 12,7 % площади поля, доза 70–80 кг/га — на 66 %, свыше 80 кг/га — на 21 % площади посева.

На рисунке 14 представлена карта внесения азота на поле озимой пшеницы.

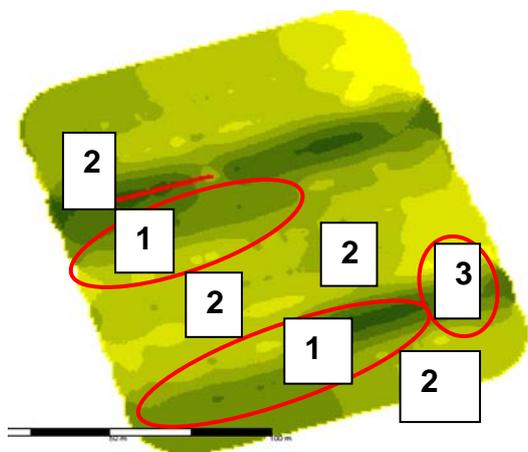


Рис. 13. Схема сценариев внесения удобрений на посевах озимой пшеницы при ранневесенней подкормке (апрель 2011 г.): 1 – 60-70 кг/га; 2 - 70-80 кг/га; 3 – свыше 80 кг/га

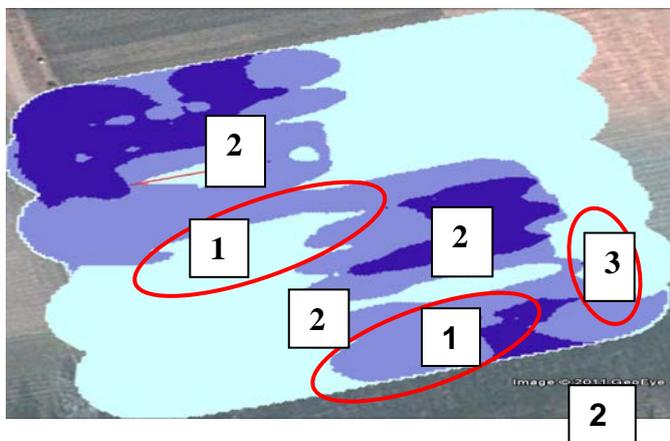


Рис. 14. Дозы внесения по технологии on-line в посевах озимой пшеницы (апрель 2011 г.): 1 – 70 кг/га; 2 – 80 кг/га; 3 - свыше 80 кг/га

Светло-голубой фон — зоны внесения стандартной дозы 70 кг/га азота. Синий фон — повышение дозы до 80 кг/га. Темно-синий фон — доза выше 80 кг/га. При сопоставлении карт видно, что по посевам с хорошей биомассой доза внесения азота составляет стандартную заданную величину 70 кг/га. Темно-синие пятна показывают, что в эти места было внесено азота из расчета более 80 кг/га с целью выравнивания биомассы посева. Наибольший интерес представляет участок с исторически низкой урожайностью, где значительно снижена доза азота.

Эффект от применения азотных удобрений прослеживался на карте биомассы (рис. 15). При сравнении двух

сроков обследования (конец апреля и начало июня) можно отметить, что после внесения азотных удобрений карта изменилась: биомасса стала более равномерной по полю. Однако «провал» биомассы четко прослеживается как в северо-восточном углу поля, где внесено 70 кг/га азота по традиционной технологии, так и на участке с исторически низкой урожайностью в юго-восточном углу поля, где заведомо была снижена доза азота (по технологии точного земледелия). После уборки урожая была построена карта урожайности озимой пшеницы (рис. 16).

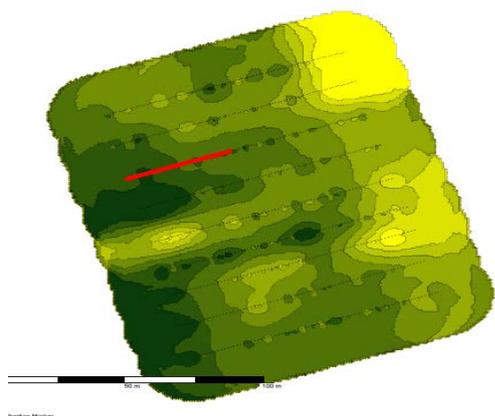


Рис. 15. Карта распределения NDVI биомассы озимой пшеницы (2011 г.)

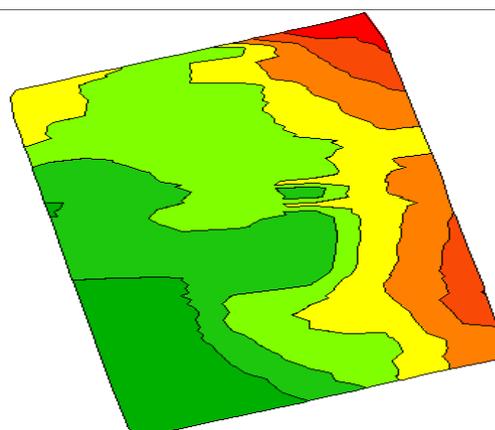


Рис. 16. Карта урожайности озимой пшеницы (2011 г.)

Критерием оценки технологии является не только урожайность, но и экономическая эффективность. Рентабельность применения азотных удобрений и их окупаемость зерном озимой пшеницы на проблемных участках опыта ЦТЗ в 2011 г. представлена в таблице 8.

Удобрения, вносимые на проблемных участках, имеют очень низкую эффективность. Поэтому на таких участках рекомендуется снижать дозы вносимых удобрений, тем самым повышая рентабельность производства [21, 22].

8. Рентабельность применения азотных удобрений и их окупаемость зерном озимой пшеницы на проблемных участках опытного поля (2011 г.)

Вариант опыта	Урожайность, т/га	Получено зерна на 1 кг внесенного азота, кг	Рентабельность применения азотных удобрений, %
Контроль (б/у)	3,4	-	-
Традиционное земледелие, азот 70 кг/га	3,73	4,7	- 44
Точное земледелие, азот 65 кг/га	4,11	10,9	+ 20

Внедрение в сельскохозяйственное производство технологии точного земледелия позволяет дифференцированно воздействовать на конкретные участки поля. Это экономит ресурсы и снижает антропогенную нагрузку на агрофитоценоз. В связи с этим изучалось совершенствование системы применения гербицидов не только в отношении сроков и кратности, но и возможности их дифференцированного внесения в точном земледелии. Данный способ внесения основывается на неравномерности распределения сорных растений по полю. Сплошное обследование и потенциальная засоренность посевов говорят о неоднородности распределения сорных растений по опытному участку. Это позволяет применять гербициды дифференцированно, используя систему Green Seeker RT 200, которая состоит из нескольких оптических датчиков, равномерно расположенных вдоль штанги опрыскивателя. За счет того, что каждый датчик имеет свой источник света, данная система может использоваться как в дневное, так и в ночное время суток. Таким образом, можно вносить препарат дифференцированно на основании показаний оптических датчиков, которые измеряют индекс вегетации биомассы NDVI и сравнивают полученные значения с заданным алгоритмом. После этого и в режиме on-line определяют норму расхода препарата на конкретном участке поля.

В опыте Центра точного земледелия было проведено исследование эффективности дифференцированного внесения гербицидов при борьбе с сорняками на посевах зерновых культур. Плотность зеленой массы культурных растений от наличия сорняков: чем их больше, тем выше индекс NDVI. При расчете расхода рабочей жидкости выбирали минимальный и максимальный показатели индекса NDVI, затем был определен расход жидкости на единицу показателя NDVI. Он равен 4,5 л/га. Координаты учетных рамок и нормы расхода рабочего раствора были введены в бортовой компьютер по делянкам, посеянным по автопилоту. Во время опрыскивания делянок компьютер определял местоположение агрегата и корректировал норму расхода жидкости, установленную по индексу NDVI. Делянки, посеянные по маркеру, опрыскивали сплошной нормой 500 л/га.

Разница в количестве сорняков после обработки гербицидом по вариантам незначительна. При полной норме расхода жидкости по традиционной технологии и при расчетной по точной, количество сорняков было практически одинаковым. Расход рабочего раствора учитывали бортовым компьютером. Экономия рабочего раствора в варианте точного земледелия составила 94 л/га.

Расчет технической эффективности применения гербицида:

Общий расход на всю площадь – 534 л.

Расход на делянках традиционного земледелия:

$$500 \text{ л/га} \cdot 0,95 \text{ га} = 295 \text{ л.}$$

Расход по варианту точного земледелия:

$$\text{NDVI} \cdot 0,95 = 239 \text{ л.}$$

Экономия составила 56 л. В расчете на 1 га – 94 л.

Представленная схема внесения гербицидов не является технологичной из-за большого объема учета сорных растений и внесения гербицида в режиме off-line. Поэтому в дальнейшем гербицид на посевах вносили в режиме on-line. Были проведены замеры индекса NDVI в посевах, и в зависимости от его показаний выставлены нормы расхода рабочей жидкости для опрыскивателя UF 901. Анализ данных показал, что индекс изменялся от 0,29 до 0,58. Коэффициент корреляции между показателями индекса NDVI на учетных площадках с сорняками и без них составил 0,86. Определив значения индекса NDVI в посевах, рассчитали общую (традиционная технология) и дифференцированную (точная технология) нормы расхода гербицида, которая вводилась в бортовой компьютер для применения на делянках, где сеяли по автопилоту (табл. 9).

9. Нормы внесения гербицида Ковбой в зависимости от индекса NDVI на однородных посевах, мг/га

Индекс NDVI	Норма внесения	
	Дифференцированная	Общая
0,25-0,35	190	190
0,35-0,45	160	
0,45-0,55	130	

Внесение гербицида на делянках, посеянных по маркеру, проводили сплошным методом с нормой 190 мг/га. При дифференцированном методе внесения в варианте точного земледелия гербицид применяли в режиме on-line, согласно индексу NDVI. Количество сорняков, как после общего внесения препарата, так и при дифференцированном внесении гербицида, различалось незначительно. Последнюю обработку проводили с использованием системы GPS, что позволило проследить движение агрегата по полю, уточнить индекс NDVI и норму расхода жидкости в каждой точке.

Если посевы зерновых культур в полевом опыте ЦТЗ были неоднородными, то расчет норм расхода гербицида по индексу NDVI неодинаков. В одном случае норму расхода увеличивали с увеличением индекса, во втором – её сокращали при повышенных значениях индекса NDVI (табл. 10).

10. Норма внесения гербицида Ковбой в зависимости от величины индекса NDVI на неоднородных посевах, л/га

Индекс NDVI	Увеличенные нормы	Уменьшение нормы	Общая
Меньше 0,30	290	410	410
0,30-0,35	314	386	
0,35-0,40	338	362	
0,40-0,45	362	338	
0,45-0,50	386	314	
0,50-0,55	410	290	

На отвальном фоне при обработке общей нормой гербицида количество сорняков сократилось почти в 5 раз, как и при уменьшении нормы, при увеличении нормы – количество сорняков сократилось в 3 раза. Надземная масса сорных растений практически одинаковая. На прямом посеве при общей норме расхода гербицида количество сорняков сократилось в 2,7 раза, надземная масса – в 2 раза, при уменьшении нормы расхода количество

сорняков уменьшилось в 2,5 раза, а при увеличении нормы – в 4,2 раза [8].

Урожайность – важнейший интегрирующий показатель эффективности и продуктивности посевов, которая зависит не только от применяемой технологии, но и от

метеоусловий вегетационного сезона и однородности почвенных свойств конкретного поля. Исходя из этих данных, составляют карту урожайности того или иного поля (рис. 17).

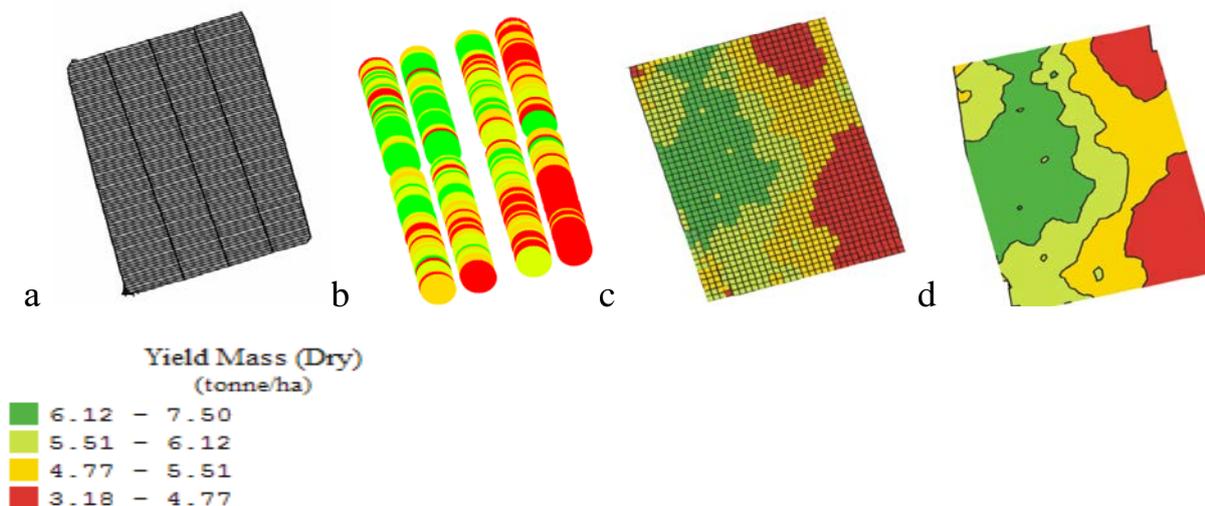


Рис. 17. Различное представление данных об урожайности культур:
а – сетка сплошного учета урожайности; б – точки по центру каждой ячейки сетки сплошного учета, размер точки 10 м; в – сетка 3×3 м; д – контур

В наших исследованиях основные изучаемые факторы – варианты опыта, представлены в двукратной повторности. В течение нескольких лет наблюдений выявлено, что из-за имеющейся неоднородности почвенных условий, отклик растений на технологию возделывания в различных частях поля проявляется по-разному, с неодинаковой интенсивностью, что порой сглаживает эффект обработки и сказывается на результатах дисперсионного анализа. Создается впечатление, что разница по урожайности культур при возделывании по разным технологиям является несущественной в пределах поля, однако, это не так. Наличие большого количества точек учета при составлении карты урожайности позволяет осуществлять новые подходы к оценке эффективности технологий, и для данной задачи более наглядно использовать не только среднее значение урожайности по учетной делянке, но и показатели доверительного интервала

для этих значений. По этой карте можно планировать программу внесения удобрений [9].

В таблице 11 представлена урожайность культур зернопропашного севооборота за период исследований.

На озимой пшенице, в среднем за 8 лет, наблюдалось превышение урожайности по точной технологии относительно традиционной по обеим обработкам почвы на 0,11 т/га. Относительно влияния обработок на урожайность культуры следует подчеркнуть, что прямой посев опережал вспашку в первые годы исследований по традиционному и точному земледелию на 0,27 т/га. Такая закономерность сохранялась пока неукоснительно соблюдались основные принципы использования нулевых технологий – своевременно и систематически применяли пестициды, качественно и в срок проводили посев озимой пшеницы с применением соответствующих сеялок, в зависимости от варианта обработки почвы [10].

11. Урожайность культур за две ротации зернопропашного севооборота в зависимости от технологии возделывания и приема обработки почвы, т/га

Технология возделывания (фактор А)	Обработка почвы (фактор В)	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	Среднее
<i>Озимая пшеница</i>										
Традиционная	Отвальная	4,23	4,50	3,65	6,31	5,80	2,75	6,74	5,00	4,87
	Нулевая	5,09	3,85	3,53	6,15	5,62	4,59	6,73	5,52	5,14
Точная	Отвальная	4,28	4,63	3,70	6,52	6,12	2,78	6,75	5,11	4,98
	Нулевая	5,18	4,11	3,55	6,35	5,87	4,56	6,75	5,60	5,25
НСР ₀₅ , т/га	Фактор А	0,08	0,15	0,06	0,17	0,21	0,04	0,03	0,09	-
	Фактор В	0,42	0,59	0,22	0,14	0,19	1,42	0,05	0,39	-
<i>Картофель</i>										
Традиционная	Отвальная	38,9	21,7	24,0	19,1	27,6	24,9	30,7	30,0	25,9
	Минимальная	36,3	19,2	22,9	17,5	25,9	23,8	25,4	27,2	24,8
Точная	Отвальная	40,5	22,2	24,4	19,9	28,5	25,1	31,1	30,5	27,8
	Минимальная	37,5	20,7	23,2	18,3	26,2	24,6	26,2	27,7	25,6
НСР ₀₅ , т/га	Фактор А	1,20	1,40	0,06	0,08	0,06	0,07	0,05	0,04	-
	Фактор В	1,18	1,04	0,90	0,56	0,16	0,90	1,08	2,11	-
<i>Ячмень</i>										
Традиционная	Отвальная	5,09	3,35	2,62	4,26	5,16	3,85	5,52	4,04	4,24
	Минимальная	5,39	2,99	2,83	4,18	5,00	4,01	5,22	3,99	4,20
Точная	Отвальная	5,40	3,47	2,76	4,33	5,20	3,88	5,55	4,11	4,34
	Минимальная	5,78	3,06	3,08	4,20	4,95	4,03	5,20	4,06	4,30
НСР ₀₅ , т/га	Фактор А	0,30	0,07	0,22	0,08	0,03	0,07	0,08	0,09	-
	Фактор В	0,26	0,31	0,25	0,90	0,13	0,17	0,28	0,19	-

Картофель за восемь лет проведения опыта сформировал урожайность по точной технологии на делянках отвальной обработки на 1,9 т/га выше традиционной, по минимальной обработке эта разница составила 0,8 т/га. Обработки почвы между собой различались: по традиционной технологии прибавка урожая картофеля 1,1 т/га в пользу вспашки, по точной – 2,2 т/га.

Точная технология на ячмене способствовала одинаковому повышению урожайности по отвальной и минимальной обработкам – на 0,1 т/га. Различия в урожайности по вариантам обработки почвы практически отсутствовали, что свидетельствует о возможности проведения как отвальных, так и минимальных обработок под замыкающую севооборот культуру в НЧЗ.

Заключение. Проведение научных и практических исследований по внедрению и освоению точного земледелия на опытном поле ЦТЗ возможно и необходимо. В результате длительных исследований (8 лет) удалось дать сравнительную оценку качества посева с применением соответствующего оборудования. Была проведена работа по дифференцированному внесению минеральных удобрений в ходе подкормки озимой пшеницы в зависимости от азотного статуса растений на поле, применению гербицидов в посевах культур с учетом их обилия и распространения в режимах off-line и on-line. Дана оценка содержания питательных веществ на различных участках поля с составлением карт плодородия, осуществлялась поделаяночная уборка зерновых культур, по итогам которой формировалась карта урожайности.

Литература

1. Точное сельское хозяйство (precision agriculture) / Под ред. Д. Шпаара, А.В. Захаренко, В.П. Якушева.- СПб-Пушкин, 2009. – 400 с.
2. Личман. Г.И. Основные направления фундаментальных и прикладных исследований по точному земледелию / Сб. тр. ВИМ.- 2005. – С. 15-19.
3. Шпаар Д. Дифференцированное управление посевами с учетом гетерогенности полей в рамках PRECISION AGRICULTURE // Агротехнологии XXI века. – М.: ФГОУ ВПО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2007. – С. 6-8.
4. Координатное земледелие: Учебное пособие / В.И. Балабанов, С.В. Железова, Е.В. Березовский, А.И. Беленков, В.В. Егоров. –М.: Изд-во РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2013. –148 с.
5. Беленков А.И., Железова С.В., Березовский Е.В., Мазиров М.А. Элементы технологии точного земледелия в полевом опыте РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева// Известие ТСХА. – 2011.- Вып. 6. – С. 90-100.
6. Беленков А.И., Березовский Е.В., Железова С.В. Совершенствование технологии возделывания картофеля в системе точного земледелия // Картофель и овощи. – 2019. – №6. – С. 30-34.
7. Мазиров М.А., Матюк Н.С., Полин В.Д., Малахов Н.В. Влияние различных систем обработки и удобрения на плодородие дерново-подзолистой почвы // Земледелие. – 2018. – №2. – С. 33-36.
8. Николаев В.А., Беленков А.И., Дмитриевская И.И. Регулирование фитосанитарного состояния посевов зерновых культур на полигоне точного земледелия // Вестник Алтайского ГАУ. – 2017. – №2 (148). – С. 5-10.
9. Агробиотехнологии XXI века: коллективная монография // Научные и практические аспекты технологии точного земледелия в полевом опыте ЦТЗ / Коллектив авторов. – ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева». – М.: ООО «Мегаполис», 2022. – С. 300-325.
10. Железова, С.В., Мельников А.В., Беленков А.И. Урожайность озимой пшеницы и ярового ячменя на дерново-подзолистой почве при длительном применении традиционной и ресурсосберегающей обработки // Кормопроизводство. – 2019. – №10. – С. 14-19.

RESULTS OF SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENT OF PRECISION FARMING IN FIELD EXPERIMENT

¹Belenkov A.I., Doctor of Agricultural Sciences Sc., professor; ²Mazirov M.A., Doctor of Biology. Sc., professor;
²Voronov M.A., assistant

¹Federal Scientific Center for Forage Production and Agroecology named after V.R. Williams"

²FGBOU HE "Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev"
¹1141055, st. Scientific town, bldg. 1, Lobnya, Moscow region, Russia

E-mail: belenokaleksis@mail.ru

²2127434, st. Timiryazevskaya, 49, Moscow, Russia

E-mail: mazirov@mail.ru; mvoronov97@gmail.com

The article generalizes and summarizes the results of the implementation and development of precision farming technology principles at the Precision Farming Center (PFC), created at the Russian State Agrarian University – MTAA named after K.A. Timiryazev to train a new generation of agricultural specialists. Based on the results of long-term research, the optimal design of sowing and planting of agricultural crops was determined, the nitrogen status of winter wheat crops was determined for timely and high-quality fertilizing. The ways to improve the system of herbicide application and the possibility of their differentiated application were outlined. The content of soil nutrients in each section of the field was assessed by taking soil samples in order to form a fertility map. Yield data on grain-row crop rotation crops are presented, while a tendency to exceed the yield of agricultural crops using precision technology can be noted in comparison with traditional ones. Data for two rotations of the experimental crop rotation on the yield of agricultural crops using various processing methods are given. It was found that direct seeding initially proved to be better for winter wheat, outpacing plowing by an average of 0.27 t / ha. Potatoes responded better to moldboard cultivation, exceeding the minimum by 1.1-2.2 t / ha. No significant difference between treatments was found on barley.

Keywords: field experiment, technology, precise, traditional, soil cultivation, moldboard, minimum, zero, fertilizers, herbicides, crop yield, experiment results.