

Н.В. Гриц ✉
Р.А. Ростовцев
А.В. Диченский

Федеральный научный центр лубяных культур, Тверь, Россия

✉ n.gritz@fncl.ru

Поступила в редакцию:
24.03.2023

Одобрена после рецензирования:
14.09.2023

Принята к публикации:
27.09.2023

Nadezhda V. Grits ✉
Roman A. Rostovtsev
Alexander V. Dichensky

Federal Scientific Center of Bast Cultures,
Tver, Russia

✉ n.gritz@fncl.ru

Received by the editorial office:
24.03.2023

Accepted in revised:
14.09.2023

Accepted for publication:
27.09.2023

Использование элементов точного сельского хозяйства для получения климатически обоснованной урожайности сельскохозяйственных культур в специализированных севооборотах

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Точное сельское хозяйство обладает потенциалом для обеспечения более совершенного и устойчивого производства продовольствия. Под этим термином подразумевается применение различных технических и программных средств для сбора, анализа и применения информации о состоянии агроценозов и реализации механизмов их корректировки непосредственно на поле. В настоящее время на рынке множество программных продуктов, которые предлагают «оцифровать» производственные процессы в АПК. Чаще всего это включает составление электронных карт полей и (на их основе) проведение дифференциации посева и внесения удобрений и ядохимикатов.

Методы. Использован широкий спектр полевых, статистических и аналитических методов.

Результаты. Проанализированы данные о возможности и эффективности применения различных элементов цифровых технологий в точном земледелии в странах с различным уровнем развития как сельского хозяйства, так и IT-технологий. Изучены возможности применения одной из цифровых агроплатформ при возделывании культур в специализированном севообороте. Представлены данные проведения эксперимента с льном-долгунцом и райграсом однолетним на оцифрованном поле и при использовании модернизированной техники. Выявлены в реальных полевых условиях особенности работы алгоритмов модулей информационно-аналитической системы управления растениеводством для специализированных севооборотов с участием льна-долгунца.

Ключевые слова: цифровизация АПК, точное сельское хозяйство, информационно-аналитическая система, цифровая агроплатформа, мониторинг технологических операций, электронная технологическая карта, климатически обеспеченная урожайность

Для цитирования: Гриц Н.В., Ростовцев Р.А., Диченский А.В. Использование элементов точного сельского хозяйства для получения климатически обоснованной урожайности сельскохозяйственных культур в специализированных севооборотах. *Аграрная наука*. 2023; 375(10): 88–94. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-375-10-88-94>

© Гриц Н.В., Ростовцев Р.А., Диченский А.В.

The use of elements of digital agriculture to obtain climate-based crop yields in specialized crop rotations

ABSTRACT

Relevance. Precision agriculture has the potential to provide better and more sustainable food production. This term means the use of various technical and software tools for collecting, analyzing and applying information about the state of agroecosystems and implementing mechanisms for their correction directly on the field. Currently, there are many software products on the market that offer to «digitize» production processes in the agro-industrial complex. Most often, this includes the compilation of electronic maps of fields and (based on them) the differentiation of sowing and application of fertilizers and pesticides.

Methods. A wide range of field, statistical and analytical methods were used.

Results. The data on the possibility and effectiveness of using various elements of digital technologies in precision agriculture in countries with different levels of development of both agriculture and IT technologies are analyzed. The possibilities of using one of the digital agricultural platforms in the cultivation of crops in a specialized crop rotation have been studied. The data of conducting an experiment with flax and annual ryegrass on a digitized field and using modernized equipment are presented. The features of the algorithms of the modules of the information and analytical plant management system for specialized crop rotations with the participation of flax are revealed in real field conditions.

Key words: digitalization of the agro-industrial complex, precision agriculture, information and analytical system, digital agro platform, monitoring of technological operations, electronic technological map, climatically secured yield

For citation: Grits N.V., Rostovtsev R.A., Dichensky A.V. The use of elements of digital agriculture to obtain climate-based crop yields in specialized crop rotations. *Agrarian science*. 2023; 375(10): 88–94 (In Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-375-10-88-94>

© Grits N.V., Rostovtsev R.A., Dichensky A.V.

Введение/Introduction

Повышенное внимание к теме цифрового сельского хозяйства со стороны государства и высокая конкуренция способствуют применению аграрными производителями новых технологических механизмов и методов работы, которые основаны на использовании интернет-технологий, спутниковой навигации, робототехники, датчиков и сенсоров, беспилотных транспортных средств. Для повышения эффективности и устойчивости отрасли растениеводства необходима цифровизация как систем производства продукции, так и процессов принятия решений на всех уровнях управления. По данным исследований, проведенных Г.С. Клычовой и другими, диджитализация сельскохозяйственных процессов позволяет повысить урожайность, продуктивность и эффективность использования материальных ресурсов, техники и человеческого потенциала [1]. При этом в отечественном сельском хозяйстве до 70% сельскохозяйственных предприятий работают по экстенсивной технологии производства сельскохозяйственной продукции, не осуществив переход на интенсивные или высокоинтенсивные технологии [2].

Точное земледелие в настоящее время использует интеграцию новых сельскохозяйственных технологий и высокоточного позиционирования на основе технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также дифференцированную высокоэффективную и экологически безопасную сельскохозяйственную деятельность на полях, основанную на подробной информации о химических и физических характеристиках каждого из них, что приводит к необходимости интеграции огромного количества информации, которая может быть обработана только технологиями искусственного интеллекта (ИИ), требующими достаточного количества структурированных и надежных данных [3].

Особое внимание уделяется необходимости комплексного использования цифровых технологий и ИИ для создания интеллектуальных интегрированных систем (ИИС) сельскохозяйственного производства. Как показывают исследования, активнее всего IT-технологии применяются в полевом земледелии при выращивании зерновых культур. Так, учеными Кабардино-Балкарской Республики разработана концепция ИИС «Умное поле» для производства семенной и товарной кукурузы, работа которой должна быть основана на использовании множества сенсоров, в том числе устанавливаемых на мобильной технике, и которая в случае положительной апробации может быть с незначительными доработками адаптирована и для производства другой растениеводческой продукции [4].

Новыми направлениями в цифровизации АПК являются создание и использование цифровых двойников. Учеными Самарского федерального исследовательского центра РАН разрабатывается концепция цифрового двойника растений — системы поддержки принятия агрономических решений для внедрения технологий точного земледелия. Цифровой двойник растений позволяет на основе климатических и почвенных данных с полей прогнозировать и моделировать состояние растений и выдавать рекомендации по обработке посевов [5].

Развитие точного земледелия, в свою очередь, требует более совершенной методологической и инструментальной базы информационного обеспечения новых технологий. За последнее десятилетие (в том числе в РФ) создано и апробировано множество программно-математических инструментов исследования влияния сложности и контрастности почвенного покрова на

продуктивность различных сельскохозяйственных культур, возделываемых с применением цифровых технологий точного земледелия. Учеными в результате апробации функционала одной из интеллектуальных систем поддержки, выработки и реализации агротехнологических решений на основе разнородных данных и проблемно-ориентированных знаний сделаны выводы о росте урожайности и улучшении качества растениеводческой продукции на фоне снижения агрохимической нагрузки на окружающую среду на 35–60% и повышения окупаемости удобрений и средств защиты растений в 1,5–1,7 раза. Например, применение дифференцированного внесения азотных удобрений по технологии точного земледелия способствует повышению урожайности в среднем за годы исследований на 29%, а экономия удобрений составила около 26% [6, 7].

Важнейшими факторами, зачастую определяющими эффективность функционирования сельскохозяйственных предприятий, являются региональные особенности, обуславливающие количество площадей, пригодных для возделывания сельскохозяйственных культур, и климатические условия, оказывающие непосредственное влияние на возделывание и уборку сельскохозяйственных культур.

По мнению Ф.А. Киприянова, применение автоматизированных погодных сервисов позволит не только оперативно оценивать текущую климатическую ситуацию, но и проводить оценку возможности внедрения новых сельскохозяйственных культур с дальнейшим формированием агроклиматической карты сельскохозяйственного предприятия, являющейся одним из условий реализации адаптивно-ландшафтного земледелия [8].

ИИ использовался учеными при оценке урожайности сельскохозяйственных культур в штате Тамилнад (Индия) с 2000 по 2015 год в зависимости от влияния различных факторов: характера осадков, показателей азота, фосфора, калия, температуры, влажности и значений pH почвы. Проводился сравнительный анализ различных алгоритмов и рекомендована к внедрению модель XGBoost для прогнозирования урожая сельскохозяйственных культур на основе параметров, учитывающих качество почвы, и обеспечивающая общую точность тестирования 99,318%. Комплексный подход, разработанный для оценки устойчивости сельскохозяйственных культур с использованием контролируемых алгоритмов, помогает повысить урожайность, сокращает ручную работу, время, затрачиваемое на различные сельскохозяйственные мероприятия, и получить рекомендуемый урожай на основе заданных параметров почвы [9, 10].

С внедрением цифровых технологий в сельскохозяйственное производство всё более востребованными становятся учет внешних условий, формирование базы данных метеорологических параметров и прогнозирование динамики вегетативного процесса возделываемых культур. Элементы точного земледелия могут быть реализованы на основе использования автоматических метеостанций. В частности, учеными Орловского ГАУ разработана методика оценки влияния на продукционный процесс некоторых почвенно-климатических параметров, предоставляемых автоматической метеостанцией, в комплекте с выносным модулем. Данный алгоритм предлагается для использования в качестве методики прогнозирования вегетационных процессов растений с использованием датчиков метеостанции «Сокол-М» [11].

Федеральный научный центр лубяных культур является оригинатором многих сортов льна-долгунца,

возделываемых на территории РФ, где разрабатываются уникальные сортовые технологии возделывания льна, в том числе по его выращиванию в специализированных севооборотах.

Учеными Федерального научного центра лубяных культур совместно со специалистами АО «Научно-исследовательский институт информационных технологий» (г. Тверь) с 2020 года проводится опытное испытание элементов информационно-аналитической системы управления ресурсосберегающим производством продукции растениеводства «Ваш урожай», в функционировании которой заложены интеллектуальные алгоритмы формирования севооборотов, программирования климатически обоснованной урожайности сортов культур, прогноза и предупреждения рисков в технологическом процессе, формирования технологических карт, расчета и корректировки норм внесения удобрений на основе данных оцифровки полей и выбранной технологии возделывания [12].

Цель исследований — апробация работы модулей информационно-аналитической системы управления ресурсосберегающим производством продукции растениеводства — агроплатформы «Ваш урожай» (АО «Научно-исследовательский институт информационных технологий», Россия) при реализации производственно-адаптированных технологий возделывания льна-долгунца на семена и однолетних трав в специализированном севообороте в условиях Верхневолжья.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводились в серии экспериментов на опытном поле Института льна — обособленного структурного подразделения Федерального научного центра лубяных культур в Торжке в 2020–2022 годах.

В качестве объектов исследования были выбраны модули информационно-аналитической системы управления ресурсосберегающим производством продукции растениеводства «Ваш урожай»¹, отвечающие за выбор сорта сельскохозяйственных культур, программирование урожайности, расчет дифференцированного внесения макро- и микроудобрений, многолетние травы (два года пользования) — клевер луговой Макаровский и тимopheевка луговая Нарымская, лен-долгунец Факел (авторство — Федеральный научный центр лубяных культур), а также райграс однолетний Викинг.

Работа модулей агроплатформы «Ваш урожай» основана на математических моделях урожайности сельскохозяйственных культур, при составлении которых учитывались принципы программирования урожайности, заложенные М.К. Каюмовым² и другими, и балансовый метод расчета доз внесения минеральных удобрений.

Для проведения эксперимента применяли карты полей в электронном kml-формате, которые объединяют координаты границ элементарных участков, сведения о содержании питательных элементов в их пределах. Технологические карты возделывания льна-долгунца, многолетних и однолетних трав, сформированные под

изучаемые сорта культур, и карты-задания в csv-формате, позволяющие проводить точное дифференцированное внесение твердых и жидких удобрений. Файлы в kml- и csv-форматах читаются при помощи программы или приложения Google «Планета Земля» (Google LLC, США).

В ходе эксперимента были определены площадь и координаты границ опытного участка с использованием приложения карты от Mapnitude (Mapnitude Co., Ltd, США), а затем (на основании данных агрохимического обследования почвы) проведена разбивка его на элементарные участки. В результате такой «оцифровки» на общей площади поля в 24 га были выделены 22 элементарных участка, из которых для проведения данного опыта было выбрано 16 (табл. 1) общей площадью 2,5 га.

При составлении и подборе технологических операций по внесению удобрений под базовую культуру севооборота лен-долгунец и выборе видов удобрений за основу брали результаты агрохимического обследования данного участка (табл. 1).

Почвы местности, где проводился эксперимент, характеризуются высоким содержанием *P* в подвижных формах и повышенной кислотностью, что позволяет не использовать фосфорсодержащие удобрения. Однако ввиду труднодоступности для растений форм *P*, содержащихся в почве, в технологии возделывания обозначено внесение стартовой дозы из расчета 1 ц/га «Азофоски». По содержанию *K* почвы относятся к слабообеспеченным, что компенсируется применением калийсодержащих удобрений. При анализе данных агрохимического обследования по содержанию микроэлементов было выявлено, что по степени обеспеченности *Zn* почвы опытного участка относятся к бедным (по Я.В. Пейве), а по содержанию *B* — к средним (по Г.Я. Ринькису), при возделывании льна-долгунца в целях сохранения иммунного статуса растений необходимо восполнение недостатка данных микроэлементов. В качестве удобрений, вносимых по дифференцированной схеме в опыте, применялись *KCl* (60%) и микроэлементный препарат «АгроНАН» (Беларусь). Таким образом, применение минеральных удобрений осуществлялось до посева основной культуры, а микроэлементный препарат вносился в подкормку по листу.

Таблица 1. Расположение и агрохимическая характеристика элементарных участков

Table 1. Location and agrochemical characteristics of elementary plots

№ варианта	№ точки	Координаты точек		pH	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	B, мг/кг	Zn, мг/кг	Гумус, %
1	7	57,04519286	35,04426817	4,6	142	92	0,4	0,82	2,15
2	8	57,04583236	35,0424021	4,81	200	52	0,4	0,82	1,95
3	9	57,04594402	35,04518254	4,65	128	78	0,3	0,88	1,79
4	10	57,04658352	35,04329781	4,62	120	90	0,3	0,88	2,05
5	11	57,04675608	35,04591031	4,75	120	64	0,54	0,82	1,85
6	12	57,04735495	35,04421219	4,44	260	86	0,54	0,82	3,04
7	13	57,04806547	35,04505192	4,34	114	40	0,57	0,81	0,93
8	14	57,04757826	35,04669406	4,52	114	34	0,57	0,81	1,69
9	15	57,04826848	35,04770173	4,67	128	86	0,32	0,64	1,11
10	16	57,04888763	35,04592897	4,48	120	61	0,32	0,64	1,84
11	17	57,04903988	35,04844816	4,72	120	34	0,58	0,98	2,15
12	18	57,04961842	35,04678736	4,64	274	40	0,58	0,98	2,26
13	19	57,04981127	35,04936253	4,48	50	76	0,25	0,6	2,43
14	20	57,05039995	35,04772039	4,61	170	48	0,25	0,6	2,51
15	21	57,05044055	35,05007164	4,66	140	64	0,33	0,63	2,05
16	22	57,05093787	35,04841084	4,48	338	74	0,33	0,63	1,87

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 12.11.2020 № 2020664357.

² Каюмов М.К. Программирование продуктивности полевых культур. М.: Росагропромиздат. 1989; 320.

Работа модуля агроплатформы «Ваш урожай», применяемого для дифференцированного внесения удобрений, основана на системе мониторинга движения техники и оборудования по территории опытного участка при помощи сервиса Wialon (Gurtam, Литва). Протоколы электронного взаимодействия системы позволяют трансформировать элементы данной технологической карты применительно к устройствам привода рабочих органов агрегатов. В качестве обратной связи система принимает данные мониторинга и позволяет внести корректировки в электронную технологическую карту.

Полученные данные подвергались статистической обработке по методике Б.А. Доспехова³.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В течение трех лет в полевых условиях на «оцифрованном» участке проводилось изучение особенностей работы цифровой агроплатформы — информационно-аналитической системы управления растениеводством в части применения функционала модулей: программирования урожайности сортов культур определенного звена севооборота в данных природно-климатических условиях; составления эколого-адаптивной, интенсивной технологии возделывания данных сортов культур; расчета и практического применения дифференцированного внесения удобрений.

Ключевым элементом использования возможностей информационно-аналитической системы является внесение информации о почвенно-климатических условиях местности, культурах, сортах и интенсивных технологиях их возделывания в конкретном регионе.

Алгоритмы системы позволяют экстраполировать технологию возделывания сорта культуры на конкретный участок местности. В данный блок работ входят логическое, научно обоснованное построение перечня технологических операций с заданными параметрами возделывания, сведенное в систему севооборотов, и создание в итоге электронной технологической карты. Каждой технологической операции система предлагает подбор технических средств и агрегатов из имеющихся на предприятии при соблюдении оптимальных технологических параметров.

Применение средств мониторинга позволяет отслеживать процесс передвижения машинно-тракторных агрегатов, задействованных в конкретной технологической операции, избегать технологических огрехов, перехлестов, а также контролировать несанкционированное расходование топливно-смазочных материалов.

Система позволяет применять новые, разрешенные к использованию удобрения, средства защиты растений в минимальных рекомендованных дозах, что дает возможность сокращать негативное воздействие на окружающую среду от применения агрохимикатов.

При выборе сортов для возделывания алгоритмы направлены на применение сорта культуры, районированного в соответствии с каталогом Госсортокмиссии⁴ и потенциально дающего максимальную урожайность на данной местности.

На опытном участке в 2020 году возделывалась многолетняя травосмесь (два года пользования), данные по продуктивности которой использовались авторами для определения пестроты почвенного плодородия и дальнейшей дифференциации внесения макроэлементов для ее снижения. Урожайность травосмеси при возделывании ее по ресурсосберегающей технологии варьировалась от 3 до 4,5 т/га сена (табл. 2) за один укос.

2020 год был очень нетипичным по метеорологическим условиям. В частности, это характеризовалось низким количеством осадков в зимний период, что явилось следствием недостатка запасов влаги в метровом слое почвы. Среднесуточные температуры в период активной вегетации трав (май — июнь) были ниже среднелетних и оптимальных. Таким образом, два фактора — недостаток продуктивной влаги и низкие суточные температуры в начале вегетации — привели к снижению уровня урожайности многолетних трав. При среднем значении урожайности 3,83 т/га была отмечена вариация отклонения от среднего (с -21,7 до 17,5%), что свидетельствует о ее значительной пестроте.

При этом авторы отметили достаточно значительные отклонения содержания K_2O на элементарных участках в разрезе общего участка (табл. 1). Содержание его варьировалось с 34 до 92 мг/кг почвы (при среднем значении 63,7 мг/кг). В итоге процент отклонения от среднего составлял от -46,6 до 41,3%, что также говорит о значительной пестроте содержания K .

Опираясь на полученные результаты, мы считаем выбранную систему дифференцированного внесения калийных удобрений обоснованной.

Дифференцированное внесение калийных удобрений проводилось согласно технологической карте в сентябре 2020 года. Стандартная доза внесения KCl для получения урожая семян льна-долгунца составляет 100 кг/га без дифференциации. Программное обеспечение цифровой агроплатформы позволило рассчитать дифференцированные по элементарным участкам дозы внесения данного удобрения (рис. 1) на основе

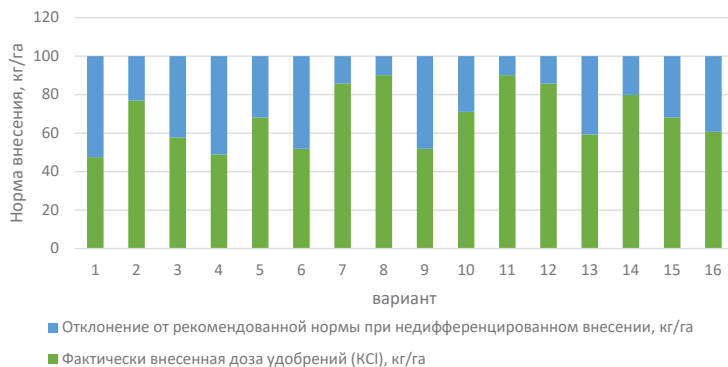
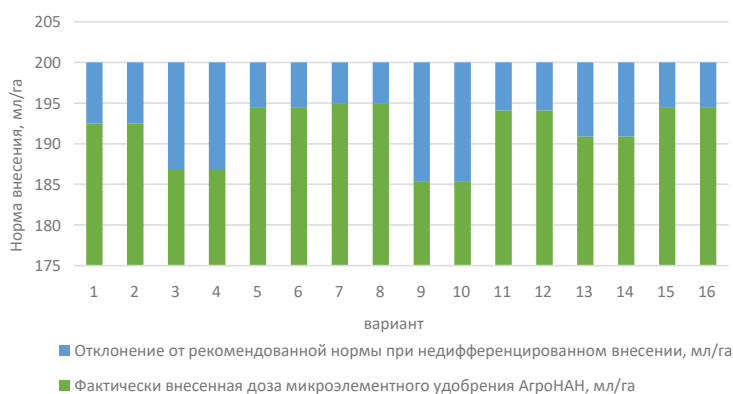
Таблица 2. Плановые и фактические показатели урожайности сельскохозяйственных культур

Table 2. Planned and actual indicators of crop yields

№ варианта	Урожайность многолетних трав (2020 г.), т/га	Урожайность льна-долгунца (2021 г.), т/га		Урожайность райграсса однолетнего (2022 г.), т/га	
		плановая	фактическая	плановая	фактическая
1	4	0,43	0,466	5,5	5,21
2	3,8	0,43	0,412	5,5	5,17
3	3,8	0,43	0,452	5,5	5,08
4	4,3	0,43	0,439	5,5	5,12
5	3,5	0,43	0,428	5,5	5,1
6	4,5	0,43	0,425	5,5	5,05
7	3,3	0,43	0,445	5,5	5,07
8	3,4	0,43	0,428	5,5	4,98
9	3,1	0,43	0,471	5,5	5,03
10	3	0,43	0,484	5,5	5,16
11	4,3	0,43	0,465	5,5	5,12
12	4,3	0,43	0,431	5,5	5,09
13	4,3	0,43	0,459	5,5	5,01
14	4	0,43	0,43	5,5	5,14
15	4	0,43	0,47	5,5	5,17
16	3,9	0,43	0,476	5,5	5,12
Среднее			0,45		5,10
НСР ₀₅			0,1		1,14

³ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс. 2014; 351.

⁴ <https://reestr.gossortrf.ru/>

Рис. 1. Нормы *KCl* при дифференцированном внесении**Fig. 1.** *KCl* norms for differentiated application**Рис. 2.** Нормы удобрения «АгроНАН» при дифференцированном внесении**Fig. 2.** Norms of fertilizer «AgroNAN» with differentiated application

содержания *K* в почве и с учетом его выноса планируемого урожая.

Сформированные карты-задания на внесение удобрений передавались в бортовой компьютер трактора. В нашем случае предварительно была проведена модернизация агрегата путем размещения на тракторе дополнительного оборудования, способного обеспечить реализацию механизма дифференцированного внесения удобрений.

Анализируя данные, можно говорить о том, что рассчитанные при помощи алгоритмов агроплатформы дозы для дифференцированного внесения *KCl* ниже рекомендованной. Дифференциация применения данного агрохимиката во всех изучаемых вариантах способствовала сокращению расхода (на 9,86–52,49%). Применение макроэлементного удобрения в точных дозах позволяет сократить не только расход самого удобрения, но и прочие статьи затрат, связанные с его внесением. По факту при стоимости 1 кг *KCl* 46 рублей на 1 га посевной площади экономия составила 1,35 тыс. рублей. Помимо экономического эффекта, нельзя не отметить, что снижение дозы *KCl* для элементарных ячеек позволяет уменьшить угнетающее воздействие *Cl* на развитие растений.

На второй год полевой эксперимент предполагал возделывание семенного посева льна-долгунца Факел. С этой целью была сформирована сортовая технология возделывания, которая основывалась на данных об эффективном плодородии почв и необходимом количестве основных питательных элементов, для получения расчетной урожайности, в том числе с применением расчетных доз удобрений. Запланированная расчетная

урожайность семян для данного сорта льна на опытном участке составляла 0,42 т/га. В качестве фактора, лимитирующего получение максимальной урожайности сорта по расчетным данным, было выявлено значение биогидротермического потенциала.

Посев льна-долгунца Факел был проведен с одинаковой нормой (40 кг/га) на все элементарные участки 23 мая 2021 года в соответствии с разработанной технологией. Уборка проведена комбайновым способом 15 августа 2021 г. Vegetационный период соответствовал авторской характеристике сорта и составил 83 дня.

Информация о всех проводимых технологических операциях вносилась в цифровую агроплатформу, где из них была сформирована фактически реализованная технологическая карта, представляющая собой электронную версию технологии возделывания льна-долгунца Факел применительно к специализированному севообороту.

Применение микроэлементного удобрения «АгроНАН» позволило восполнить недостаток ключевых для развития растений льна-долгунца микроэлементов — *Zn* и *B*, которые влияют не только на урожайность, но и на качество получаемого семенного материала. Внекорневая подкормка препаратом «АгроНАН» проводилась дифференцированно по рассчитанным интеллектуальными механизмами агроплатформы дозам в фазу «елочки — начало бутонизации» (рис. 2).

Согласно инструкции по применению рекомендованная для льна норма внесения — 200 мл/га. Фактически внесенные по вариантам дозы препарата на элементарные участки меньше рекомендуемой (на 2,5–7,4%).

Результаты полевого эксперимента показывают, что полученная при возделывании по рекомендованной ФГБНУ ФНЦ ЛК технологии урожайность семян льна-долгунца Факел в среднем по вариантам опыта составила 0,45 т/га (табл. 2). По данным метеорологического наблюдения, погодные условия вегетационного периода 2021 года отличались от среднемноголетних. В частности, комплексный агрометеорологический показатель — биогидротермический потенциал — превышал среднемноголетний показатель, что явилось следствием увеличения урожайности семян льна-долгунца. При этом вариация урожайности по сравнению со средним значением находилась в пределах 0,412–0,484 т/га, процент отклонения от среднего не превышал 8,24%, что подтверждает правильность выбранной стратегии дифференцированного внесения калийных и микроэлементных удобрений.

На основании этого можно говорить об удаленном контроле и управлении посредством цифровой платформы реализации сортовой технологии возделывания льна-долгунца, что легло в основу научного обоснования алгоритмов работы модулей информационно-аналитической системы производства продукции растениеводства применительно к специализированным льняным севооборотам.

На третий год проведения исследований на опытном участке проведен учет урожая посеянного по научно обоснованной технологии райграса однолетнего

Викинг. Прогнозируемая урожайность данного сорта с учетом условий местности — 5,5 т/га. Посев проводился во II декаде мая, отрастание до первого укоса составило 56 дней — это соответствует характеристике сорта. Фактическая урожайность по элементарным участкам была однородной и в среднем составляла 5,1 т/га в пересчете на сено с влажностью 16% (табл. 2).

Интервал различий урожайности по вариантам местообитания — 5,01–5,21 т/га, а отклонения от среднего составляли не более 2,16%. Погодные условия 2022 года способствовали активному началу отрастания многолетних трав и успешному прорастанию, дружным всходам и развитию однолетних культур. Однако вторая половина вегетационного периода характеризовалась недостатком продуктивной влаги в почве, низким количеством осадков и повышенной температурой воздуха. Данная ситуация негативно отразилась на отавности и низкой урожайности второго укоса многолетних трав, ускоренном накоплении суммы активных температур и, следовательно, созревании однолетних культур при, возможно, недостаточном продукционном наливе, что в свою очередь привело к недополучению потенциальной урожайности.

Таким образом, авторами были проверены реализованные в агроплатформе «Ваш урожай» механизмы расчета реально возможной урожайности применяемых

сортов льна-долгунца и райграсса однолетнего в конкретном местообитании. Проведена апробация автоматизированного подбора соответствующей технологии и интеллектуального расчета норм внесения удобрений под лен-долгунец Факел на предварительно оцифрованном поле.

Выводы/Conclusion

По результатам исследований определена возможность эффективного применения модуля информационно-аналитической системы управления ресурсосберегающим производством продукции растениеводства «Ваш урожай» для получения климатически обеспеченной урожайности сельскохозяйственных культур.

Доказано, что система дифференцированного внесения удобрений способствует выравниванию показателей урожайности возделываемых в специализированном севообороте культур — льна-долгунца и райграсса однолетнего.

Использование в производственных процессах агропредприятий модулей цифровой агроплатформы позволит усилить результативность деятельности посредством увеличения урожайности культур севооборота до климатически обоснованной на данной местности при неукоснительном соблюдении представленной сортовой технологии возделывания.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Материалы подготовлены в рамках выполнения госзадания ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» по теме FGSS-2019-0017.

FUNDING

The materials were prepared as part of the implementation of Federal State Budgetary Institution «Federal Scientific Center of Bast Crops» on the topic FGSS-2019-0017.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клычова Г.С., Закирова А.Р., Валиев А.Р., Юсупова А.Р., Хусаинова А.С. Повышение эффективности системы управления растениеводством на основе цифровых технологий. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021; 16(3): 121–127. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-121-127>
2. Семенов С.А., Васильев С.А., Максимов И.И. Особенности реализации и перспективы применения технологий цифрового земледелия в АПК. *Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018; (1): 69–76. <https://elibrary.ru/xoceqg>
3. Зацаринный А.А., Меденников В.И., Райков А.Н. Интеграция приложений искусственного интеллекта в единую цифровую платформу АПК. *Информационное общество*. 2023; (1): 127–138. https://doi.org/10.52605/16059921_2023_01_127
4. Нагоев З.В., Шуганов В.М., Заммоев А.У., Бжихатлов К.Ч., Иванов З.З. Разработка интеллектуальной интегрированной системы «Умное поле». *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2022; (1): 81–91. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-1-81-91>
5. Скобелев П.О., Табачинский А.С., Симонова Е.В., Журавель Ю.Н., Мятлов Г.Н. О некоторых методах расчета состояния посевов в сервисе цифрового двойника растений. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2022; 24(3): 100–111. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2022-24-3-100-111>
6. Якушев В.П. Цифровые технологии точного земледелия в реализации приоритета «Умное сельское хозяйство». *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019; (2): 11–15. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/2/11-15>
7. Якушев В.П., Якушев В.В., Матвеенко Д.А. Интеллектуальные системы поддержки технологических решений в точном земледелии. *Земледелие*. 2020; (1): 33–37. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10109>
8. Киприянов Ф.А. Использование цифровых технологий при оценке климатических условий сельскохозяйственного производства. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2019; (1): 70–74. <https://elibrary.ru/rhqzhn>
9. Lad A.M., Bharathi K.M., Saravanan B.A., Karthik R. Factors affecting agriculture and estimation of crop yield using supervised learning algorithms. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 62(7): 4629–4634. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.080>
10. Akhter R., Sofi S.A. Precision agriculture using IoT data analytics and machine learning. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022; 34(8-B): 5602–5618. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.05.013>

REFERENCES

1. Klychova G.S., Zakirova A.R., Valiev A.R., Yusupova A.R., Husainova A.S. Increasing the efficiency of the crop management system based on digital technologies. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2021; 16(3): 121–127 (In Russian). <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-121-127>
2. Semenov S.A., Vasiliev S.A., Maksimov I.I. Features of implementation and application prospects of digital technology in agro-industrial complex. *Vestnik Chuvash State Agrarian Academy*. 2018; (1): 69–76 (In Russian). <https://elibrary.ru/xoceqg>
3. Zatsarinny A.A., Medennikov V.I., Raikov A.N. Integration of agricultural artificial intelligence applications into a single digital platform. *Information Society*. 2023; (1): 127–138 (In Russian). https://doi.org/10.52605/16059921_2023_01_127
4. Nagoev Z.V., Shuganov V.M., Zammoev A.U., Bzhikhatlov K.Ch., Ivanov Z.Z. Development of an intelligent integrated system «Smart field». *News of the SFU. Technical sciences*. 2022; (1): 81–91 (In Russian). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-1-81-91>
5. Skobelev P.O., Tabachinskiy A.S., Simonova E.V., Zhuravel Yu.N., Myatov G.N. Regarding some of the methods for crop state calculation in digital twin of plant. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022; 24(3): 100–111 (In Russian). <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2022-24-3-100-111>
6. Yakushev V.P. Digital technologies of precision agriculture in the implementation of the priority «Smart agriculture». *Bulletin of the Russian Agricultural Science*. 2019; (2): 11–15 (In Russian). <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/2/11-15>
7. Yakushev V.P., Yakushev V.V., Matveenko D.A. Intelligent systems for technology decision support in precision agriculture. *Zemledelie*. 2020; (1): 33–37 (In Russian). <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10109>
8. Kipriyanov F.A. The use of digital technologies in assessing the climatic conditions of agricultural production. *Agrarian Bulletin of the Upper Volga region*. 2019; (1): 70–74 (In Russian). <https://elibrary.ru/rhqzhn>
9. Lad A.M., Bharathi K.M., Saravanan B.A., Karthik R. Factors affecting agriculture and estimation of crop yield using supervised learning algorithms. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 62(7): 4629–4634. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.080>
10. Akhter R., Sofi S.A. Precision agriculture using IoT data analytics and machine learning. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022; 34(8-B): 5602–5618. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.05.013>

11. Родимцев С.А., Еремин Л.П., Гуляева Т.И. Прогнозирование вегетационных процессов растений с использованием автоматической метеостанции «Сокол-М». *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2021; (3): 21–30. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-59-3-21-30>

12. Гриц Н.В., Диченский А.В., Пролетова Н.В., Удотов А.Ю. Применение элементов информационно-аналитической системы управления растениеводством для обеспечения ресурсосберегающего производства семян льна в условиях Тверской области. *Аграрная наука*. 2022; (7-8): 126–131. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-126-131>

11. Rodimtsev S.A., Eremin L.P., Gulyaeva T.I. Prediction of vegetation processes of plants using the automatic weather station «Sokol-M». *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2021; (3): 21–30 (In Russian). <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-59-3-21-30>

12. Grits N.V., Dichensky A.V., Proletova N.V., Udotov A.Yu. Application of elements of the information and analytical system of crop management to ensure resource-saving production of flax seeds in the Tver region. *Agrarian science*. 2022; (7-8): 126–131 (In Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-126-131>

ОБ АВТОРАХ

Надежда Владимировна Гриц,
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории агротехнологий
n.gritz@fncl.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3954-2646>

Роман Анатольевич Ростовцев,
доктор технических наук, член-корреспондент РАН, директор
r.rostovcev@fncl.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>

Александр Владимирович Диченский,
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, руководитель отдела образования
a.dichenskiy@fncl.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1803-268X>

Федеральный научный центр лубяных культур,
Комсомольский пр-т, 17/56, Тверь, 170041, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Nadezhda Vladimirovna Grits,
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Laboratory of Agricultural Technologies
n.gritz@fncl.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3954-2646>

Roman Anatolyevich Rostovtsev,
Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director
r.rostovcev@fncl.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>

Alexander Vladimirovich Dichensky,
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Education
a.dichenskiy@fncl.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1803-268X>

Federal Scientific Center of Bast Crops,
17/56 Komsomolsky Prospekt, Tver, 170041, Russia