УДК 57.013:631.153.7

Агроэкологическая оптимизация технологии выращивания ярового ячменя в условиях Пензенской области с применением СППР

Бузылёв А.В., Тихонова М.В., Васенев И.И.

РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Аннотация

В статье представлены результаты моделирования возделывания ячменя сорта Эйфель на выщелоченных чернозёмах Башмаковского района Пензенской области. В целях проведения моделирования была модернизирована Система поддержки принятия решений (СППР) агроэкологической оптимизации адаптивных систем земледелия. Адаптация программных модулей к климатическим и почвенным условиям конкретного района исследования позволила выйти на 7% погрешности при проведении моделирования возделывания сельскохозяйственных культур при наличии полного набора показателей, необходимых для построения модели. Технологические расчёты модели позволили снизить количество минимально необходимых технологических операций, а также рационально распределить внесение минеральных удобрений под планируемую урожайность. Экономические расчёты модели позволили достигнуть высокой рентабельности производства: $66 \pm 7\%$. Построенная модель была апробирована на опытном поле АО «Башмаковский хлеб» в 2020 году. Практическая верификация показала возможность применения модели в сельскохозяйственном производстве при нормальных климатических условиях и её высокую корреляцию с фактически полученными результатами. Статистический анализ расчётных данных модели и фактическая урожайность с достигнутыми экономическими показателями в условиях модельного поля показали уровень достоверности расчётов 95%.

Ключевые слова АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ,
АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА, АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Введение

В связи с принятой и развиваемой на территории Российской Федерации политикой разработанных «зелёных стандартов» возникает острая необходимость проведения

адаптации существующих технологий возделывания сельскохозяйственных культур к требованиям экологизации растениеводства. Целью этих стандартов является повышение уровня доверия к сертификации экологической продукции, популяризация экологически ориентированных товаров и методов производства и, как следствие, повышение спроса на экологичную инновационную продукцию, услуги и технологии.

Технологии растениеводства, применяемые на данный момент ведущими сельхозтоваропроизводителями, чаще всего основаны на адаптивно-ландшафтном подходе без учёта экологической составляющей качества почвенного покрова и зачастую базируются на морально устаревшей системе «программирования урожайности» с расчётом доз внесения основных питательных веществ под заданный урожай, не беря в расчёт последствия уже внесённых минеральных и органических удобрений, а также вынос накопленных макроэлементов с урожаем и их частичный возврат при перепашке пожнивных остатков. Достижение уровня по-настоящему экологически качественной «зелёной» продукции также невозможно без наличия базовой информации об актуальном агроэкологическом качестве почв, на которых планируется получать данную продукцию.

Предлагаемая к использованию модель, включённая в СППР агроэкологической оптимизации адаптивных систем земледелия, позволяет гибко настроить расчёт полного комплекса показателей при моделировании возделывания конкретной сельскохозяйственной культуры на основе её сортового агроэкологического паспорта с учётом потребностей конкретного сорта в климатических и почвенных характеристиках [1].

Материалы и методы

В качестве модельного использовалось высококультурное опытное поле, расположенное в Башмаковском районе Пензенской области на территории АО «Башмаковский хлеб». Площадь поля 120 га., из них разбитые на регулярную стометровую сеть обследования – 100 га. Почвы представлены чернозёмом выщелоченным мощным гумусным глинистым незродированным [2].

Поле является вершиной плоского водораздельного холма (рис. 1) с пологими склонами 2-4° всех экспозиций. Преобладающая экспозиция – северо-западная. Микрорельеф представлен формами суффозионных процессов - блюдцами и западинами.

Рис. 1. Цифровая модель рельефа опытного поля

Группировка почв модельного поля по содержанию питательных веществ, проведённая в рамках его агроэкологической оценки, представлена в таблице 1.

Таблица 1. Группировка почв модельного поля по содержанию питательных веществ

min	max	Степень обеспеченности	Кол- во, га	%	min	max	Степень обеспеченности	Кол- во, га	%
Азот, мг/кг (по методу Корнфилда)					Фосфор подвижный, мг/кг (ГОСТ 26204-91)				
101	150	низкая	75	75	101	150	повышенная	32	32
151	200	средняя	15	15	151	200	высокая	68	68
Калий обменный мг/кг (ГОСТ 26204-91)					Гумус, мг/кг по (ГОСТ 26213-91)				
81	120	повышенная	71	71	6.1	8.0	повышенная	98	98
121	180	высокая	29	29	8.1	10	высокая	2	2

Выщелоченные чернозёмы модельного поля показали низкое содержание азота, что, по нашему мнению, связано с применяемой в хозяйстве высокоинтенсивной системой земледелия и является типичным для подобных почв на территории Пензенской области. Содержание фосфора и калия оценивается в среднем как повышенное. Также повышенное содержание гумуса может свидетельствовать о наличии положительного баланса питательных элементов и отсутствии явных деградационных процессов почвенного покрова [3].

Обменная кислотность пахотного горизонта pH (солевое) определялась

потенциометрическим методом и варьировала в диапазоне от 4.6 до 5.0, что характеризует почву как среднекислую. Гидролитическая кислотность пахотного горизонта составляла 6.8 ppm, сумма поглощённых оснований – 32.5 ppm при степени насыщенности основаниями 82.6%. Среднее содержание кальция и магния определено на уровне 24.0 : 3.8 ppm.

Содержание микроэлементов и тяжёлых металлов в пахотном горизонте почвы представлено в таблице 2.

Таблица 2. Среднее содержание микроэлементов и тяжелых металлов в пахотном горизонте, мг/кг

S	B	Cu	Zn	Mo
4.9	2.3	0.1	0.3	0.1
Pb	Cd	Hg	Ni	As
13.1	0.3	0.0	0.1	2.2

Проведённая агроэкологическая оценка опытного поля показала отсутствие превышений предельно допустимых концентраций тяжёлых металлов в пахотном горизонте. Почвенно-экологический бонитет SAB был оценен на уровне 72 баллов.

В качестве моделируемого объекта использовался ячмень яровой (*Hordeum vulgare* L.) разновидность нутанс, сорт ЭЙФЕЛЬ (EIFEL)®, SECOBRA Recherches, Франция. Максимальная урожайность данного ячменя была достигнута при Государственных испытаниях в Курской области и составила 77.1 ц/га. Сорт характеризуется как интенсивного типа с высокой устойчивостью к засухе, болезням и стрессовым условиям.

Направление использования данного сорта – пивоваренное (низкое содержание протеина, высокая экстрактивность).

Вегетационный период культуры (70-80 дней) позволяет её возделывание в условиях Пензенской области. Сорт устойчив к полеганию, что является актуальным для условий модельного поля. Выбор сортов, как и распределение посевных площадей в структуре севооборота, сейчас очень сильно зависит от потенциального покупателя. Так, и в данном случае сорт был рекомендован к возделыванию крупнейшим в регионе покупателем пивоваренного ячменя.

Моделирование проводили на основе районированной версии СППР агроэкологической оптимизации адаптивных систем земледелия, разработанной под руководством профессора И.И. Васенева. Программный комплекс предназначен для

информационного обеспечения управляющих решений по оптимизации размещения культур и сортов, разработке динамики структуры севооборота с учётом агроэкологических характеристик земель, технико-экономических возможностей хозяйства, а также климатического и ценового прогнозов [1].

В процессе моделирования производится оценка технологических затрат с расчётом рентабельности сельскохозяйственного производства в условиях конкретного поля. Отдельно выполняется оптимизация приемов и способов обработки почв и внесения удобрений и средств защиты растений в процессе вегетации культуры. Исходные данные СППР берутся из первоначально заполненных баз данных, которые формируются и насыщаются на основе оперативной информации результатов почвенных исследований, а также нормативной информации из районированных методических указаний.

Часть нормативных данных содержится в модели в виде массивов констант или вводится оператором модели по требованию программы. СППР, имеет открытую рамочную архитектуру, что позволяет производить коррекцию модели «на лету», а также значительно модернизировать весь комплекс СППР.

Результаты и обсуждение

Адаптация СППР по агроклиматическим условиям модельного поля производилась на основе расчёта средних значений требуемых параметров модели с использованием открытых архивных данных meteoinfo.ru и gp5.ru. Данные платформы предоставляют возможность получить архив метеонаблюдений с дискретностью снятия показателей 3-4 раза в сутки.

Показатели обсчитывались с применением программы STATISTICA по данным за 10 лет, предшествующих году моделирования, позволяя достичь минимальных отклонений в последующих расчётах с учётом тенденций глобального изменения климата. Итоговые значения суммы активных температур оказались выше принятых среднестатистических данных по Пензенской области, а сумма осадков по месяцам незначительно ниже принятой статистики с перенаправлением их распределения на осенне-зимний период из зимне-весеннего. (рис. 2).

Таблица климатических данных

Вводите среднестатистические суммы температур, наблюдаемые на территории хозяйства

	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Мак сумма T > 5 град.	362	684	732	827	798	555	264
Сумма T > 5 град.	187	508	572	654	607	398	143
Сумма T > 10 град.	60	508	572	654	607	398	1

Даты перехода через T > 5, 10 градусов

Порядковый номер →	весна		осень	
	день	месяц	день	месяц
Для Мак сумм T > 5 град.	3	4	24	10
Для сумм T > 5 град.	9	4	19	10
Для сумм T > 10 град.	26	4	29	9

Внимание! Перед нажатием на кнопку "Выполнить", все ячейки таблиц должны быть заполнены целыми числами →

Выполнить Close

Константы ФАР

Вводите константы, используемые для определения ФАР {A, B} и радиационного баланса {Ab, Bb}

Месяц	A*10 ⁻¹	B*10 ⁻³	Ab*10 ⁻¹	Bb*10 ⁻³
апрель	34.27	13.32	19.01	19.67
май	29.14	12.07	14.95	15.27
июнь	28.33	11.94	14.70	15.51
июль	25.79	11.39	12.88	13.20
август	22.01	9.16	10.68	11.20
сентябрь	18.91	8.18	9.12	9.46
октябрь	16.38	7.25	7.39	7.25

Внимание! Если содержимое таблицы не соответствует данным для Вашего региона, введите нужные значения и нажмите кнопку "Выполнить" →

Выполнить Close

Осадки

Среднестатистическое количество осадков по месяцам, выпавших в данном хозяйстве

январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
58	43	47	47	40	64	67	37	54	45	45	42

Рис. 2. Модули климатической базы данных агроэкологических характеристик объекта

Заполнение параметров моделируемого ячменя, таких как калорийность, сумма частей основной и побочной продукции, стандартная влажность и коэффициент водопотребления, производилось на основе данных его агроэкологического паспорта из Государственного реестра селекционных достижений.

Расчётные нормативы окупаемости применения минеральных удобрений на выщелоченных чернозёмах были установлены на уровне: N – 0.45, P – 0.26, K – 0.25. Коэффициенты окупаемости по среднему уровню плодородия, соответствующему текущим характеристикам модельного поля, были установлены на уровне: N – 0.48, P – 1.3, K – 1.43. Коэффициенты использования NPK из органических и минеральных удобрений по годам, а также их вынос с урожаем вводились по рекомендациям, разработанным в 2000 году во ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии.

Почвенные данные модельного поля (рис. 3) заносились в агроэкологический паспорт и включали в себя метрические параметры для расчётов экономических затрат и средние параметры почв для экологического моделирования и адаптации агротехнологий. База агроэкологического паспорта также включает в себя историю поля по применяемому чередованию и урожайности сельскохозяйственных культур, а также дозы внесённых органических, минеральных удобрений и мелиорантов.

**Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»**

Агроэкологический паспорт поля

Для просмотра параметров выбрано поле - ШП-19
Степень эродированности - Незероированные Мех. состав - Глинистый
Год заполнения - 2020 Тип почв - Черноземы выщелоченные

Метрические характеристики поля			Средние параметры почвы		
Наименования	Размерн.	Значения	Наименования	Размерн.	Значения
Площадь поля	га	100	Кислотность (рН солевой)	рН	4.7
Длина гона	км	0.5	Гидролит. кислотность	мг-экв/100г	6.8
Удаление от склада ГСМ	км	21	Содержание гумуса	%	6.4
Удаление от склада урожая	км	23	Мощность гум. горизонта	см	87
Удаление от склада удобрений	км	21	Содерж. фосфора (по Чирикову)	мг/100г	103.3
Крупизна склонов	град	2	Содерж. калия (по Чирикову)	мг/100г	198.2
Плотность сложения	г/куб.см	1.28	Содерж. азота (по Корндфилду)	мг/100г	121.8
Экспозиция склонов (сев.южн.)	-	сев.	Сумма поглощенных оснований	мг-экв/100г	27.8

Дозы внесения удобрений по годам (за 10 лет)					История поля за 10 лет	
Год\Вид	Орган., т/га	Извес., т/га	Азотные, кг/га	Фосфор., кг/га	Годы	Урожай, ц/га
2020	0	0	0	0	2020	Ячмень
2019	0	0	105	32	2019	Озимая пшеница
2018	0	0	0	0	2018	Чистый пар
2017	0	0	66	20		
2016	0.2	0	113	39		

Если просмотр поля завершен --->

Нажми, изменение параметры поля для текущего расчет

Рис. 3. Агроэкологический паспорт моделируемого поля

Процесс моделирования возделывания ячменя проводился поэтапно набором комплексных задач.

1. Выбор поля, указание предшественника и предпредшественника, выбор моделируемой культуры из составленной базы данных и расчёт её потенциальной урожайности на модельном поле с учётом полного комплекса агроэкологических характеристик и лимитирующих почвенных условий. Потенциальная урожайность ячменя сорта Эйфель, обеспеченная приходом ФАР, составила 93.72 ц/га; обеспеченная продуктивной влагой – 30.27 ц/га; обеспеченная приходом ФАР, агроклиматическими и агроэкологическими условиями – 65.17 ц/га. С учетом значительного недостатка продуктивной влаги на модельном поле дальнейшие расчёты проводились под среднюю потенциальную урожайность по данным Госсортоиспытаний, что составило 55 ц/га.

2. Расчёт потребности в удобрениях под планируемую урожайность с учётом поправочных коэффициентов на агроэкологическое состояние модельного поля при интенсивной экологически безопасной системе земледелия показал необходимость внесения 155 кг/га азотных и 41 кг/га фосфорных удобрений по действующему веществу. По результатам моделирования необходимость внесения калийных удобрений отсутствовала.

При распределении доз внесения удобрений модель учитывает запашку пожнивных

остатков культуры-предшественника в количестве 0.1 т/га, что сразу приводит к положительному балансу элементов питания [4]. Также экспертным методом было распределено внесение требуемого количества удобрений на фазы развития и, исходя из технологической оснащённости конкретного производителя сельскохозяйственной продукции, были подобраны формы и вид минеральных удобрений.

Модель рассчитала необходимость предпосевного внесения аммиачной селитры в количестве 100 кг/га. Посев по рекомендации СППР необходимо производить с одновременным внутрипочвенным внесением сульфоаммофоса в количестве 150 кг/га. Больше в течение вегетации культуры подкормки не требуются.

При заданной цене реализации готовой продукции 140 руб./т экономический эффект от применения удобрений в общем расчётном количестве 250 кг/га составил $77018.8 - 7484.1 = 69534.7$ руб.

В текущей версии СППР был запущен в тестовом режиме Модуль рекомендации поставщиков химических удобрений, позволяющий оптимально подобрать производителя удобрений из соображения цена / экологичность. Апробация данной функции производилась впервые, и результат удалось получить только по фосфорным удобрениям. При указании поиска максимально экологичных удобрений СППР предложила применять сульфоаммофос ФосАгро по критерию минимального содержания кадмия на уровне 5%, указав, что у иных производителей данный показатель колеблется от 7.5 до 15 %.

3. Экспресс-анализ минимально необходимых затрат для возделывания культуры на модельном поле позволил выбрать основные технологические операции и рассчитать стоимость их применения, которая на поле площадью 100 гектар составила 155 тысяч рублей (рис. 4).

4. Общая технология возделывания ячменя и расчёты экономических затрат на поле были выполнены по среднерыночной (по данным Яндекс.маркет) стоимости семян, конечной продукции, удобрений и средств защиты растений.

На основе добавленного в базу данных набора имеющейся в хозяйстве сельскохозяйственной техники и агрегатов СППР предложила ресурсосберегающую технологию возделывания культуры (рис. 5).

Бузылёв А.В., Тихонова М.В., Васенев И.И. Агроэкологическая оптимизация технологии
выращивания ярового ячменя в условиях Пензенской области с применением СППР

Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо»

Расчет затрат по полю

Выполняется задача расчета технологических затрат по полю - ШП-19
общей площадью = 100 га

Почвовлагосберегающая машинная технология возделывания яровых зерновых культур

Названия операций	Учет опер.	Выработка за 1 час, га	Затраты труда на 1 га, чел.-час	Затраты топлива на 1 га, кг	Затр. на операцию по полю, руб.
Лушение стерни (дисковое)	☒	2.26	0.44	7.37	37521.0
Безотвальная ярусная обработка почвы	☒	4.13	0.24	15.50	58350.0
Щелевание зяби (поперек склонов > 3°)	☐	4.10	0.24	6.77	0.0
Снегозадержание	☐	5.60	0.18	2.97	0.0
Закрытие влаги весной	☒	8.40	0.12	3.30	14490.0
Предпосевная культивация	☒	6.70	0.12	2.70	12510.0
Посев с внесением мин. удобрений	☒	4.91	0.40	4.80	27840.0
Подкормка посевов	☒	10.50	0.10	0.67	5211.0

Суммарные затраты на выбранную технологию для заданного поля составили - 155922.0 руб.

Яровых зерновых культур по предшественникам

Введите цену в рублях 1 чел.-час. 300 и 1 кг топлива 33

OK

Close

Выполнить

Рис. 4. Расчёт технологических затрат модели СППР

Учитываемые параметры.....>	Срок проведения	Техническое средство		Условные	Обслуживающей персонал, чел.		Затраты труда на 1 га, чел.-час	
Технологические операции	оптимальный	основное	машина	гектары	механиз.	рабочие	механиз.	рабо
1. Вспашка на гл. 20-22 см	25/07-15/08	K-700A	JD-2430	1.35	1	0	0.76	с
2. Ранневесеннее боронование	30/03-10/04	JD-6155M	JD-2635	0.11	1	0	0.13	с
3. Погрузка минеральных удобрений	14/04-30/04	Камаз	Manitou	0.3	1	1	0.14	0.1
4. Внесение минеральных удобрений	14/04-30/04	Бел.892	GZ-24	0.18	1	0	0.34	с
5. Протравливание семян	14/04-15/04	-	ПС-20M	0.05	0	1	0	0.
6. Подвоз семян, удобрений	14/04-30/04	Камаз	Manitou	0.06	1	2	0.1	0.
7. Посев с рядковым удобр. NP	14/04-30/04	JD-6125M	JD-DB37	0.20	1	1	0.3	0.
8. Подвоз воды (раствора)	25/05-31/05	ГАЗ-АЦ	-	0.06	1	0	0.5	с
9. Обработка посевов инсект.+гербицид	25/05-31/05	МТЗ	QC-3450	0.17	1	1	0.22	0.2
8. Подвоз воды (раствора)	23/06-30/06	ГАЗ-АЦ	-	0.06	1	0	0.5	с
9. Обработка посевов инсект.+фунгицид	23/06-30/06	МАЗ 4240	-	0.17	1	1	0.22	0.2
10. Прямое комбайнирование	07/08-20/08	JD-S760	-	2.14	1	1	0.78	0.7

Отображение данных выбранной технологии

Передача данных для расчетов

Печать

Cancel

Рис. 5. Предложенная СППР технология возделывания ячменя на модельном поле

Сводная таблица затрат, построенная по моделируемой технологии в автоматическом режиме, показала прибыль с поля 2,782 тысячи рублей при прибыли с гектара 7 800 рублей. Рентабельность производства без учёта стоимости транспортировки, очистки, сушки и хранения зерна до продажи составила от 59.4 до 72.9 % (и, в основном,

зависела от стоимостных характеристик удобрений и средств защиты растений при оптимальном уровне урожайности. При повышении или понижении уровня урожайности моделируемой культуры рентабельность снижалась пропорционально и при достижении потенциальной урожайности 65.17 ц/га равнялась 0%.

Выводы

Моделирование, проведённое с применением СППР агроэкологической оптимизации адаптивных систем земледелия, позволило рассчитать потенциальную урожайность ярового ячменя сорта Эйфель на модельном поле и на основе полученных данных составить ресурсосберегающую технологию возделывания сельскохозяйственной культуры. Натурное применение данной технологии под планируемую урожайность подтвердило точность расчётов с полученным в 2020 году урожаем 55.93 ц/га, что позволило выйти на рентабельность сельскохозяйственного производства, сопоставимую с прогнозированной моделью и составившую 42%. Отклонение расчётной рентабельности от фактической было связано с ростом стоимости минеральных удобрений и средств защиты растений, а также со снижением стоимости конечной продукции на рынке зерна относительно заложенной в модель. Корректировка данных моделирования под итоговые ценовые показатели по итогам апробации позволила установить уровень достоверности расчётов в 95%.

Полученные результаты позволяют говорить о целесообразности применения данной модели конечными сельхозтоваропроизводителями и необходимости её развития на широкий перечень возделываемых на территории модельного хозяйства сельскохозяйственных культур для дальнейшей апробации и верификации.

Работа выполнена при поддержке НЦМУ «Агротехнологии будущего» по направлению «Исследование и разработка новых самообучающихся интеллектуальных СППР агроэкологической оптимизации адаптивных систем земледелия».

Список использованных источников

1. Васенев И.И., Бузылёв А.В. Геоинформационно-методическое обеспечение агроэкологического мониторинга земель и агроэкологической оптимизации земледелия //

ДОКЛАДЫ ТСХА: сборник научных трудов. – Москва: Изд-во РГАУ-МСХА. – 2007. – С. 317-321.

2. Бузылёв А.В. Агроэкологическая оценка высоко окультуренных пахотных угодий на выщелоченных чернозёмах Башмаковского района Пензенской области // Сборник статей «Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию А.В. Леонтовича». – Москва. – 2019. – С. 108-110.

3. Бесалиев И.Н., Мальчиков П.Н., Шутарева Г.И., Джанчаров Т.М., Морев Д.В., Ярославцев А.М., Курашов М.Ю. Анализ лимитирующих агроэкологических факторов урожайности и качества твердой пшеницы в засушливых условиях // Достижения науки и техники АПК. – 2019. – № 12. – С. 30-37.

4. Веретельникова И.В., Морев Д.В., Ярославцев А.М. Разработка методов мониторинга урожайности пшеницы с использованием вегетационных индексов в Саратовской области по данным космического аппарата Landsat // Сборник статей «Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию А.В. Леонтовича». – Москва. – 2019. – С. 121-123.

=====

Цитирование:

Бузылёв А.В., Тихонова М.В., Васенев И.И. Агроэкологическая оптимизация технологии выращивания ярового ячменя в условиях Пензенской области с применением СППР [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – №4. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/4/st_422.pdf. DOI: <https://doi.org/10.51419/20214422>.