

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЛЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В СЕВООБОРОТАХ ЛЕСОСТЕПИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ

Александр Сергеевич Акименко, *доктор сельскохозяйственных наук*
Вячеслав Иванович Свиридов, *доктор сельскохозяйственных наук*
Татьяна Алексеевна Дудкина, *кандидат сельскохозяйственных наук*
Наталья Валерьевна Долгополова, *доктор сельскохозяйственных наук*
ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», г. Курск, Россия
E-mail: vniiz.sevooborot@mail.ru

Аннотация. Цель исследования – выявить существенные закономерности в использовании посевами природных ресурсов урожайности и удобрений, пригодных для поддержки принятия решений цифровыми технологиями. Предложен метод прогнозирования урожайности зерновых культур с учетом влагообеспеченности посевов и норм азота в составе минеральных удобрений, основанный на закономерной взаимосвязи между накапливаемой посевами энергией и расходом воды. Сопоставлены ежегодные прогнозные величины урожайности с экспериментальными, полученными в стационарном опыте на черноземе типичном тяжелосуглинистом, и это стало подтверждением статистической надежности прогнозов урожайности ярового ячменя и озимой пшеницы, размещаемой после надежных предшественников, обеспечивающих получение своевременных и дружных всходов. Продуктивность севооборотов, рассчитанная на основе закономерной взаимосвязи между обменной энергией и содержанием азота в товарной части урожая по поступлению в почву удобрений, с достаточной точностью совпала с фактической. Экономико-экологический эффект при одинаковых нормах минеральных удобрений оказался наименьшим и наибольшим соответственно в зернопаропашном и плодосменном севооборотах. Наличие закономерностей для прогнозирования урожайности и воспроизводства плодородия почвы позволяет на этапе проектирования конкретных севооборотов (и при их модернизации), используя цифровые технологии, выбирать наиболее экономически целесообразные из возможных схем севооборотов применительно к специализации, финансовому состоянию и инфраструктуре сельхозпредприятий. Обязательное условие – отсутствие в севообороте заведомо неприемлемых чередований.

Ключевые слова: Центральное Черноземье, севооборот, озимая пшеница, ячмень, вода, азот, энергия

PATTERNS FOR DIGITALIZATION OF GRAIN CROP PRODUCTION IN THE CROP ROTATIONS OF THE CENTRAL BLACK EARTH R EGION FOREST-STEPPE

A.S. Akimenko, *Grand PhD in Agricultural Sciences*
V.I. Sviridov, *Grand PhD in Agricultural Sciences*
T.A. Dudkina, *PhD in Agricultural Sciences*
N.V. Dolgoplova, *Grand PhD in Agricultural Sciences*

Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Agricultural Kursk Research Center”, Kursk, Russia
E-mail: vniiz.sevooborot@mail.ru

Abstract. The purpose of the study is to identify significant patterns in the use by crops of natural resources of yields and fertilizers, suitable for decision support through the use of digital technologies. The results are as follows: a method is proposed for predicting the yield of grain crops, taking into account the moisture supply of crops and nitrogen norms in the composition of mineral fertilizers, based on a regular relationship between the energy accumulated by crops and water consumption; comparison of the annual predicted yield values with the experimental ones obtained in the stationary experiment on typical heavy loamy chernozem confirmed statistical reliability of the yield forecasts for spring barley and winter wheat, sown after reliable predecessors that provide timely and vigorous shoots; the productivity of crop rotations, calculated on the basis of the regular relationship between the exchange energy and the nitrogen content in the marketable part of the yield by the input of fertilizers into the soil, coincided with the actual productivity with sufficient accuracy; the economic and environmental effect against the background of equal rates of mineral fertilizers turned out to be the smallest and the largest ones, respectively, in the grain-fallow-row crop and field crop rotations. The presence of patterns for predicting yields and reproducing soil fertility allows, at the stage of designing specific crop rotations (also during their modernization), using digital technologies, to choose the most economically feasible of the possible crop rotation schemes in relation to specialization, financial condition and infrastructure of agricultural enterprises. A prerequisite for making adequate decisions at the same time, there is the absence of obviously unacceptable alternations in the crop rotation.

Keywords: Central Chernozem Region, crop rotation, winter wheat, barley, water, nitrogen, energy

Из всех функций севооборота наиболее общей, независимой от почвенно-климатических условий и специализации сельскохозяйственных предприятий выступает управление вещественно-энергетическими

потоками в системе «почва – агроценоз – атмосфера». Оно заключается в принятии безошибочных решений на основе оценки существенности и наличия необходимых для формирования урожая ресурсов. [2]

Поддержка принятия решений с использованием цифровых технологий нацелена на повышение продуктивности и экономической эффективности земледелия, снижение негативного влияния на окружающую среду. Однако индекс цифровизации (доля организаций, использующих цифровые технологии, %) в сельском хозяйстве, к настоящему времени меньше, по сравнению с энергетикой и здравоохранением, финансовым сектором и промышленностью, соответственно в 1,3; 1,5 и 1,7 раза. [5] Устранение этого отставания реально при расширении интернет-сервисов для улучшения взаимодействия в рамках бизнес-процессов и обеспечения связи сельхозпредприятий с товаропроводящими цепочками.

Из-за значительного увеличения потребности в продовольствии на перспективу (рост численности населения и важность повышения качества жизни) необходимо развитие цифровизации для высокоэффективного использования природных ресурсов урожайности и удобрений, воспроизводства плодородия почвы и минимизации неблагоприятных условий погоды, основой для чего могут стать закономерности в формировании урожайности в зависимости от воды и элементов минерального питания. [1] Такое направление в цифровизации сельского хозяйства востребовано для практической реализации Долгосрочной стратегии развития зернового комплекса Российской Федерации.

Цель работы – выявить существенные закономерности в использовании посевами природных ресурсов урожайности и удобрений, пригодные для цифровизации производства зерновых в севооборотах лесостепи Центрального Черноземья. Для ее достижения решали задачи: проверить и уточнить зависимость урожайности зерновых культур от влагообеспеченности и норм азота в составе минеральных удобрений, оценить соответствие прогнозных величин урожайности фактическим; сравнить фактическую продуктивность севооборотов с рассчитанной по участию в ее формировании удобрительных средств, определить эколого-экономическую эффективность севооборотов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на основе анализа результатов многолетнего стационарного опыта, заложенного одновременно в пространстве и времени всеми полями, что позволило ежегодно иметь экспериментальные данные по всем вариантам. Повторность трехкратная, расположение вариантов – систематическое. Посевная площадь элементарной делянки – 202,5 м² (8,1 × 25,0 м). Почва – чернозем типичный тяжелосуглинистый. Агрохимическая характеристика почвы по слоям 0...20 и 20...40 см: содержание гумуса по Тюрину – 5,28 и 4,94%; рН_{KCl} – 6,35 и 6,70; гидролитическая кислотность Нг – 3,54 и 3,06 мг-экв./100 г; сумма поглощенных оснований – 30,0 и 31,4 мг-экв./100 г; азот щелочногидролизующий – 18,6 и 17,4 мг-экв./100 г; фосфор подвижный (по Чирикову, ГОСТ 26204-91) – 100,9 и 94,9 мг/кг, калий подвижный – 91,1 и 85,5 мг/кг соответственно.

Первый фактор в схеме опыта – севообороты (А): зернопаропропашной – черный пар, озимая пшеница, сахарная свекла, кукуруза на силос,

ячмень; сидеральный – сидеральный пар (люпин белый в фазе цветения), озимая пшеница, сахарная свекла, кукуруза на силос, ячмень; плодосменный – бобы конские на зерно, озимая пшеница, сахарная свекла, люпин белый на зерно, ячмень. Степень биологизации севооборотов повышалась в приведенном порядке. Доля зерновых и пропашных культур в структуре зернопаропропашного и сидерального севооборотов составила по 40%, в плодосменном соответственно 80 и 20%.

Второй фактор составили четыре уровня удобренности (фактор Б): 1. Контроль без удобрений. 2. N₃₀P₃₀K₃₀. 3. N₄₀P₄₀K₄₀. 4. N₅₂P₅₂K₅₂ – в среднем на 1 га севооборотной площади. Вносили нитроаммофоску (NPK 16:16:16) или нитрофоску (NPK 12:12:12). Озимая пшеница и сахарная свекла испытывали непосредственное влияние минеральных удобрений, а ячмень и зернобобовые их последствие в севообороте. Нетоварную часть урожая заделывали в почву.

Урожайность зерновых учитывали методом сплошного обмолота с последующим пересчетом на чистое зерно при стандартной влажности. Для прогноза урожайности и контроля плодородия почвы использовали методику информационно-энергетического анализа. [1] Статистическая оценка совокупности ежегодных отклонений прогнозной урожайности от фактической выполнена на основании принадлежности их к площади под кривой нормального (гауссовое) распределения вероятностей. [4] Сидеральную массу и нетоварную часть урожая при расчете продуктивности севооборотов не учитывали, так как заделывали в почву.

Рассчитывали показатели экономико-экологической эффективности на основании урожайности культур в опыте и отчетов об отраслевых показателях деятельности организаций агропромышленного комплекса Курской области. Учтены затраты непосредственно связанные с получением урожая и на себестоимость продукции. Эколого-экономическую эффективность севооборотов оценивали по разнице между прибылью от реализации продукции и затратами на достижение уравновешенного баланса гумуса. Последние вычисляли через стоимость необходимого количества навоза.

Метеорологические условия для зерновых по годам значительно варьировали. Разница между наибольшим и наименьшим количеством осадков за период влагонакопления (поздняя осень – ранняя весна) – 1,7, а от весны до времени наступления полной спелости зерна – в 3 раза.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основу для прогноза урожайности составила закономерная взаимосвязь между накопленной посевами энергией (Е) и расходом воды (Р), зависящим от влагообеспеченности (М) и способности конкретных культур использовать воду, характеризующуюся безразмерным коэффициентом (Кр). Умножением последнего на влагообеспеченность (сумма весенних запасов продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы с осадками за вегетационный период) определяли расход воды за вегетацию,

произведение которого на 0,567 ГДж/мм (прирост энергии фитомассы при расходе 1 мм воды) обеспечивало расчет накопленной посевами энергии и урожайности (через $K_{уо}$) в натуральном выражении (табл. 1).

Вероятность концентрации энергии в зерне (и в товарной части других культур севооборота) повышается при увеличении нормы азота в удобрениях. В прогнозных расчетах к $K_{уо}$ неудобренного варианта прибавляется тысячная доля от натурального логарифма действующего вещества азота в составе удобрений. Пригодность такого прогнозирования для озимой пшеницы и ярового ячменя подтверждена экспериментальными данными других научно-исследовательских учреждений региона. [7, 8, 10]

В стационарном опыте в среднем за годы исследований урожайность озимой пшеницы в пределах одинаковых норм удобрений оказалась на 30% больше, чем после бобов при меньших отклонениях ее прогнозных величин (табл. 2).

Эти различия в зависимости от предшественников не противоречат результатам других исследований в Центральном Черноземье. Увеличение норм удобрений способствовало повышению урожайности пшеницы после всех предшественников, но в меньшей степени после бобов. Относительная прибавка урожайности за семь лет в наиболее удобренном варианте, сравнительно с неудобренным, составила после черного пара, сидерального пара и бобов соответственно 36,8%, 33,6 и 23,0%.

Урожайность ячменя при размещении после люпина в среднем на всех фонах удобрений была на 12% большей, по сравнению с размещением его после кукурузы на силос (табл. 3). Прибавка урожайности к контролю в наиболее удобренном варианте составила 20...22%.

В годы исследований отклонения прогнозной урожайности от фактической отличались от среднелетних. По озимой пшенице они варьировали от -0,01...-0,84 до 0,05...0,47 т/га (от -2,0...-13,1 до 2,9...12,8%) после черного и сидерального паров, а после бобов на зерно оказалась в большинстве случаев выше наименьшей существенной разницы.

У ячменя отклонения в меньшую или большую сторону (исключение 2020 год, когда расчетная урожайность превысила фактическую в 1,3...1,4 раза из-за засухи во второй половине вегетации) были в основном в пределах достоверности различий независимо от предшественников. Лучшая точность прогнозов по этой культуре объясняется зависимостью урожайности от влагообеспеченности, а для озимой пшеницы решающее значение имела возможность получения своевременных и дружных всходов в зависимости от предшественников.

Несовпадение между прогнозной и экспериментальной урожайностью отразилось в трех стандартных отклонениях, оказавшихся под кривой нормального распределения (табл. 4), при котором внутри пределов двух стандартных отклонений находится 95,46% значений случайной величины. [4] Так как в агрономических исследованиях пользуются вероятностью 95% (HCP_{05}), а допустимая точность прогноза определяется точностью экс-

Таблица 1.
Порядок прогнозирования урожайности зерновых на примере данных стационарного опыта в варианте без удобрений, среднее за 2016–2022 годы

Предшественник	$M, мм$	Kp	$P, мм$	$E, ГДж$	$K_{уДж/т}$	Урожайность, т/га		
						ρ^*	φ^*	$\frac{\rho-\varphi}{\rho}, \%$
Озимая пшеница								
Черный пар	455	0,72	327	186	0,025	4,65	4,61	0,9
Сидеральный пар	425	0,72	303	172	0,025	4,30	4,60	-7,0
Бобы на зерно	398	0,72	287	162	0,025	4,05	3,22	20,5
Ячмень яровой								
Кукуруза на силос	380	0,67	254	144	0,024	3,45	3,07	11,0
Люпин на зерно	393	0,67	263	149	0,024	3,58	3,35	6,5
Бобы на зерно								
Ячмень	399	0,65	259	147	0,018	2,64	2,71	-6,6
Люпин на зерно								
Сахарная свекла	360	0,65	234	133	0,018	2,39	2,37	0,8

Примечание. * – расчетная, φ – фактическая.

Таблица 2.
Сопоставление расчетной и фактической урожайности (т/га) озимой пшеницы в зависимости от предшественников и удобрений, среднее за 2016–2022 годы

Удобрение	Предшественник								
	черный пар			сидеральный пар			бобы на зерно		
	ρ	φ^*	$\frac{\rho-\varphi}{\rho}, \%$	ρ	φ^*	$\frac{\rho-\varphi}{\rho}, \%$	ρ	φ^*	$\frac{\rho-\varphi}{\rho}, \%$
$N_0 P_0 K_0$	4,65	4,61	0,9	4,30	4,60	-6,5	4,05	3,22	20,5
$N_{60} P_{60} K_{60}$	5,18	5,21	-0,6	5,17	5,22	-1,0	4,58	3,90	14,8
$N_{80} P_{80} K_{80}$	5,60	5,48	2,1	5,44	5,51	-7,0	4,95	4,14	16,4
$N_{100} P_{100} K_{100}$	5,72	6,31	-5,9	5,56	6,15	-10,6	5,17	4,38	15,3
HCP_{05}	A	0,44							
	Б	0,39							
	АБ	0,75							

Таблица 3.
Сопоставление расчетной и фактической урожайности (т/га) ячменя ярового в зависимости от предшественников и удобрений, среднее за 2016–2022 годы

Внесено на 1 га севооборота	Предшественник					
	кукуруза на силос			люпин на зерно		
	ρ	φ	$\frac{\rho-\varphi}{\rho}, \%$	ρ	φ	$\frac{\rho-\varphi}{\rho}, \%$
$N_0 P_0 K_0$	3,07	2,97	3,3	3,46	3,35	3,2
$N_{30} P_{30} K_{30}$	3,48	3,31	4,9	3,89	3,64	6,4
$N_{40} P_{40} K_{40}$	3,67	3,44	6,3	4,07	3,83	5,9
$N_{52} P_{52} K_{52}$	3,83	3,61	5,7	4,24	4,07	4,0
HCP_{05}	A	0,37				
	Б	0,38				
	АБ	0,45				

перимента, то описанный метод прогнозирования можно признать приемлемым для яровых зерновых и озимых после надежных предшественников. При внесении в почву с низким содержанием фосфора только азотных удобрений фактическая урожайность (и зерновая продуктивность севооборотов) бывает меньше ожидаемой. [3]

Таблица 4.
Статистическая оценка отклонения в годы исследований
расчетных величин урожайности озимой пшеницы и ячменя

Культура	Статистическая надежность, %		
	± δ*	± 2δ	± 3δ
Озимая пшеница после:			
черного пара	60,7	96,4	100,0
сидерального пара	53,6	96,4	100,0
бобов на зерно	10,7	28,6	100,0
Ячмень после:			
кукурузы на силос	75,0	96,4	100,0
люпина на зерно	75,0	96,4	100,0

Примечание. * – стандартное отклонение.

Выявленная взаимосвязь урожайности зерновых с нормами азота в удобрениях и влагообеспеченностью благодаря мониторингу последней, позволяет не только предотвращать перерасход азота, избыток которого в почве порождает ряд экологических проблем, но и целенаправленно влиять на формирование почвенного плодородия. [12, 13]

Для контроля над воспроизводством плодородия почвы важны закономерности: содержание обменной энергии в любой части урожая в ГДж (энергетический эквивалент кормовой единицы) равно полусумме азота и пентаоксида фосфора в кг (в зерне более двух третей приходится на азот); энергосодержание (ГДж) 1 т гумуса равно половине (кг) заключенного в ней азота [1] (в 1 т гумуса почвы опытного участка содержится 23 ГДж энергии или 46 кг азота). Отчуждение азота напрямую связано с количеством обменной энергии в товарной части урожая. Наличие его в доступной для растений форме зависит от внесения в почву минеральных удобрений, возврата с побочной продукцией,

направления трансформации зеленого удобрения и лабильной части гумуса. Рассчитанная с учетом перечисленных источников азота продуктивность севооборотов оказалась несколько завышенной (табл. 5). В большинстве случаев отклонения не превысили 10% без искажения действия изучаемых факторов.

В варианте без минеральных удобрений продуктивность всех севооборотов сформировалась в основном из-за наличия доступного азота при убыли гумуса – в зернопаропропашном севообороте на 73,3%, что в 1,2 раза больше, чем в сидеральном и плодосменном. Вклад азота минеральных удобрений в накопление отчуждаемой обменной энергии увеличивался по мере роста продуктивности пашни благодаря повышению уровня удобренности, способствующему уменьшению расхода гумуса. Благодаря последнему в наиболее удобренном варианте зернопаропропашного севооборота сформировалось 36,7% продуктивности или в два раза меньше, по сравнению с вариантом без удобрений. Это согласуется с законом возврата и тем фактом, что в условиях региона с увеличением норм удобрений уменьшается потребление азота из почвы, а его нехватка на формирование урожая при достаточной влагообеспеченности компенсируется минерализацией гумуса. [6, 9]

Наличие закономерностей для прогнозирования урожайности и воспроизводства плодородия почвы позволяет на этапе проектирования конкретных севооборотов (и при их модернизации) выбирать наиболее экономически целесообразные из возможных схем севооборотов применительно к специализации, финансовому состоянию и инфраструктуре сельхозпредприятий.

Во всех севооборотах нашего опыта повышение уровня удобренности способствовало улучшению

Таблица 5.
Формирование продуктивности севооборотов в зависимости от удобрений и состава культур, среднее за 2016–2022 годы

Удобрение	Накопление обменной энергии (ГДж/га в год) за счет								$\frac{\rho - \Phi}{\rho}, \%$
	минерализации					минеральных удобрений	всего		
	соломы зерновых	соломы бобовых	ботвы сахарной свеклы	сидерата	гумуса		ρ*	φ	
Зернопаропропашной севооборот									
N ₀ P ₀ K ₀	6,2	–	6,5	–	43,2	0,0	55,9	56,0	–0,2
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	6,3	–	6,9	–	33,8	20,0	67,0	61,9	7,6
N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	6,4	–	7,0	–	30,8	26,6	70,8	65,7	7,2
N ₅₂ P ₅₂ K ₅₂	6,5	–	7,1	–	28,0	34,6	76,2	68,8	9,7
Сидеральный севооборот									
N ₀ P ₀ K ₀	6,2	–	6,5	10,2	36,6	0,0	59,5	58,3	2,0
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	6,3	–	6,9	10,8	25,5	20,0	69,5	63,3	8,9
N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	6,4	–	7,0	10,9	21,4	26,6	72,3	67,7	6,4
N ₅₂ P ₅₂ K ₅₂	6,5	–	7,1	10,9	18,8	34,6	77,9	70,4	9,6
Плодосменный севооборот									
N ₀ P ₀ K ₀	6,0	6,8	6,5	–	34,3	0,0	53,6	52,3	2,4
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	6,2	6,8	6,9	–	22,8	20,0	62,7	56,7	9,6
N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀	6,3	6,8	7,0	–	20,5	26,6	67,2	60,0	10,7
N ₅₂ P ₅₂ K ₅₂	6,3	6,8	7,1	–	17,5	34,6	72,3	63,7	11,9

Таблица 6.

Экономико-экологическая эффективность севооборотов в зависимости от уровня удобрённости на 1 га в год, среднее за 2016–2022 годы

Показатель	Удобрение	Севооборот		
		зернопаропропашной	сидеральный	плодосменный
Стоимость продукции, тыс. руб.	$N_0 P_0 K_0$	40,9	42,2	47,8
	$N_{30} P_{30} K_{30}$	44,6	45,9	52,3
	$N_{40} P_{40} K_{40}$	46,8	47,7	55,1
	$N_{52} P_{52} K_{52}$	50,1	51,2	58,7
Затраты на производство продукции, тыс. руб.	$N_0 P_0 K_0$	24,1	26,0	29,4
	$N_{30} P_{30} K_{30}$	26,7	28,5	32,8
	$N_{40} P_{40} K_{40}$	28,2	29,9	34,9
	$N_{52} P_{52} K_{52}$	30,3	32,4	37,4
Прибыль от реализации продукции, тыс. руб.	$N_0 P_0 K_0$	16,8	16,2	18,4
	$N_{30} P_{30} K_{30}$	17,9	17,4	19,5
	$N_{40} P_{40} K_{40}$	18,6	17,8	20,2
	$N_{52} P_{52} K_{52}$	19,8	18,8	21,3
Уровень рентабельности производства продукции, %	$N_0 P_0 K_0$	69,7	62,3	62,7
	$N_{30} P_{30} K_{30}$	67,0	61,1	59,5
	$N_{40} P_{40} K_{40}$	66,0	59,5	58,0
	$N_{52} P_{52} K_{52}$	65,3	58,0	56,9
Дефицит гумуса в почве, т	$N_0 P_0 K_0$	-1,88	-1,59	-1,49
	$N_{30} P_{30} K_{30}$	-1,47	-1,11	-0,99
	$N_{40} P_{40} K_{40}$	-1,34	-0,93	-0,89
	$N_{52} P_{52} K_{52}$	-1,22	-0,82	-0,76
Стоимостная оценка дефицита гумуса, тыс. руб.	$N_0 P_0 K_0$	-9,4	-8,0	-7,4
	$N_{30} P_{30} K_{30}$	-7,4	-5,6	-5,0
	$N_{40} P_{40} K_{40}$	-6,7	-4,7	-4,4
	$N_{52} P_{52} K_{52}$	-6,1	-4,1	-3,8
Годовой экономико-экологический эффект, тыс. руб.	$N_0 P_0 K_0$	7,4	8,2	11,0
	$N_{30} P_{30} K_{30}$	10,5	11,8	14,5
	$N_{40} P_{40} K_{40}$	11,9	13,1	15,8
	$N_{52} P_{52} K_{52}$	13,7	14,7	17,5
Уровень экономико-экологической рентабельности, %	$N_0 P_0 K_0$	30,7	31,5	37,4
	$N_{30} P_{30} K_{30}$	39,3	41,4	44,2
	$N_{40} P_{40} K_{40}$	42,2	43,8	45,3
	$N_{52} P_{52} K_{52}$	45,2	45,4	46,8

экономических показателей (табл. 6). Стоимость продукции на наиболее удобренном фоне, по сравнению с вариантом без минеральных удобрений, увеличилась на 21...23%, но из-за роста затрат на производство продукции на 25...27% прибыль составила 16...18%. Это изменение соотношения между прибылью и затратами обусловило при большей удобренности некоторое уменьшение уровня рентабельности.

Экономика природы в земледелии и в общепринятом понимании совпадают в необходимости восстановления средств производства, поэтому затраты на воспроизводство плодородия почвы — аналог амортизационных отчислений. Затраты на воспроизводство плодородия уменьшались по мере повышения норм минерального удобрения. В биологизированных сидеральном (зеленое удобрение) и плодосменном (40% зернобобовых) севооборотах в неудобренном варианте оказались соответственно на 14,9 и 21,3% меньшими по сравнению с зернопаропропашным, а при наибольшем уровне удобрений в 1,5...1,6 раза. Наиболее удобренный вариант севооборотов пре-

взошел контрольный по экономико-экологическому эффекту в 1,6...1,8 раза, а по уровню экономико-экологической рентабельности — 1,3...1,5.

Таким образом, закономерные количественные взаимосвязи между накопленной посевами энергией из-за расхода посевами воды и вероятностью концентрации ее в товарной части урожая в зависимости от поступления в почву азота могут быть использованы для цифровизации непосредственного производства зерновых культур. Обязательное условие для принятия адекватных решений — отсутствие в севообороте заведомо неприемлемых чередований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Акименко А.С. Методика использования ресурсов в земледелии на основе информационно-энергетического анализа. Курск: ЮМЭКС, 2000. 76 с.
2. Альт В.В., Чекусов М.С., Исакова С.П. Применение цифровых технологий при возделывании зерновых культур. Технические культуры // Научный сельскохозяйственный журнал. 2022. № 1 (2). С. 3–9. DOI: 10.54016/SVITOK.2022.66.59.001.

3. Волюнкина О.В. Предельные прибавки урожайности сельскохозяйственных культур от азота и его окупаемость на черноземе // Плодородие. 2021. № 2. С. 9–14. DOI: 10.25680/S19948603.2021.119.03.
4. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: учеб. пособие. М.: Колос, 1973. 336 с.
5. Косогор С. Трансформация сельского хозяйства: цифровые возможности развития // Системы безопасности. 2022. № 3. URL: <https://www.secuteck.ru/articles/transformaciya-selskogo-hozyajstva-cifrovye-vozmozhnosti-razvitiya> (дата обращения 15 марта 2023 года).
6. Минакова О.А., Александрова Л.В., Подвигина Т.Н. Продуктивность зерносвекловичного севооборота при краткосрочном и длительном применении удобрений в ЦЧР // Земледелие. 2021. № 2. С. 18–22. DOI: 10.24411/0044-3913-2021-10204.
7. Новичихин А.М., Чайкин В.В. Урожайность сортов ярового ячменя при различных уровнях минерального питания в сочетании со стимуляторами роста // Агротехнический вестник. 2022. № 3. С. 10–16. DOI: 10.24412/1029-2551-2022-3-002.
8. Тютюнов С.И., Солнцев П.И. Влияние интенсивности применения удобрений и средств защиты растений на урожайность культур в зернопропашном севообороте // Сахарная свекла. 2021. № 10. С. 33–36. DOI: 10.25802/SB.2021.92.47.007.
9. Цыгуткин А.С., Азаров А.В. Изучение влияния технологий возделывания сельскохозяйственных культур и почвы, как саморазвивающейся системы, на содержание гумуса // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 6. С. 44–49. DOI: 10.24411/0235-2451-2021-10608.
10. Шабалкин А.В., Драчева М.К., Воронцов В.А., Skorochkin Ю.П. Реакция ячменя на средства интенсификации и приемы обработки чернозёмных почв в северо-восточном регионе Черноземья // Земледелие. 2022. № 6. С. 41–48. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-6-41-45.
11. Шарков И.Н., Колбин С.А., Самохвалова Л.М. Проблема азота при использовании чернозема выщелоченного по интенсивной технологии в лесостепи Западной Сибири // Агротехника. 2021. № 2. С. 3–10. DOI: 10.31857/S0002188121020101.
12. Lubkowski K. Environmental impact of fertilizer use and slow release of mineral nutrients as a response to this challenge // Polish J. Chem. Technol. 2016. V. 18. P. 72–79.
13. Zhang W.F., Dou Z.X., He P. et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China // Proceed. Nat. Acad. Sci. USA. 2013. V. 110. № 21. P. 8375–8380.
2. Al't V.V., Chekusov M.S., Isakova S.P. Primenenie cifrovyyh tekhnologiy pri vozdeleyvaniy zernovykh kul'tur. Tekhnicheskie kul'tury // Nauchnyj sel'skohozyajstvennyj zhurnal. 2022. № 1 (2). S. 3–9. DOI: 10.54016/SVI-TOK.2022.66.59.001.
3. Volynkina O.V. Predel'nye pribavki urozhajnosti sel'skohozyajstvennykh kul'tur ot azota i ego okupaemost' na chernozeme // Plodorodie. 2021. № 2. S. 9–14. DOI: 10.25680/S19948603.2021.119.03.
4. Dospikhov B.A. Metodika polevogo opyta: ucheb. posobie. M.: Kolos, 1973. 336 s.
5. Kosogor S. Transformaciya sel'skogo hozyajstva: cifrovye vozmozhnosti razvitiya // Sistemy bezopasnosti. 2022. № 3. URL: <https://www.secuteck.ru/articles/transformaciya-selskogo-hozyajstva-cifrovye-vozmozhnosti-razvitiya> (дата обращения 15 марта 2023 года).
6. Minakova O.A., Aleksandrova L.V., Podvigina T.N. Produktivnost' zernosveklovnichnogo sevooborota pri kratkosrochnom i dlitel'nom primenenii udobrenij v CCHR // Zemledelie. 2021. № 2. S. 18–22. DOI: 10.24411/0044-3913-2021-10204.
7. Novichihin A.M., Chajkin V.V. Urozhajnost' sortov yarovogo yachmenya pri razlichnykh urovnnyah mineral'nogo pitaniya v sochetanii so stimulyatorami rosta // Agrohimiicheskij vestnik. 2022. № 3. S. 10–16. DOI: 10.24412/1029-2551-2022-3-002.
8. Tyutyunov S.I., Solncev P.I. Vliyanie intensivnosti primeneniya udobrenij i sredstv zashchity rastenij na urozhajnost' kul'tur v zernopropashnom sevooborote // Saharnaya svekla. 2021. № 10. S. 33–36. DOI: 10.25802/SB.2021.92.47.007.
9. Cygutkin A.S., Azarov A.V. Izuchenie vliyaniya tekhnologiy vozdeleyvaniya sel'skohozyajstvennykh kul'tur i pochvy, kak samorazvivayushchejsya sistemy, na sodержanie gumusa // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2021. T. 35. № 6. S. 44–49. DOI: 10.24411/0235-2451-2021-10608.
10. Shabalkin A.V., Dracheva M.K., Voroncov V.A., Skorochkin Yu.P. Reakciya yachmenya na sredstva intensivnizatsii i priyomy obrabotki chernozyomnykh pochv v severo-vostochnom regione Chernozem'ya // Zemledelie. 2022. № 6. S. 41–48. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-6-41-45.
11. Sharkov I.N., Kolbin S.A., Samohvalova L.M. Problema azota pri ispol'zovanii chernozema vyshchelochennogo po intensivnoy tekhnologii v lesostepi Zapadnoj Sibiri // Agrohimiya. 2021. № 2. S. 3–10. DOI: 10.31857/S0002188121020101.
12. Lubkowski K. Environmental impact of fertilizer use and slow release of mineral nutrients as a response to this challenge // Polish J. Chem. Technol. 2016. V. 18. P. 72–79.
13. Zhang W.F., Dou Z.X., He P. et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China // Proceed. Nat. Acad. Sci. USA. 2013. V. 110. № 21. P. 8375–8380.

REFERENCES

1. Akimenko A.S. Metodika ispol'zovaniya resursov v zemledelii na osnove informacionno-energeticheskogo analiza. Kursk: YUMEKS, 2000. 76 s.

Поступила в редакцию 22.05.2023
Принята к публикации 05.06. 2023