

Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 2 (50). С. 3–10  
Vestnik Kurganskoy GSNA. 2024; (2-50): 3–10.

## СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

## Научная статья

УДК 631.582

Код ВАК 4.1.1

EDN: EEEYZKF

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ УКРОЧЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ СЕВООБОРОТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОСНОВ КОМБИНАТОРИКИ

Петр Алексеевич Смирнов<sup>1</sup>, Михаил Петрович Смирнов<sup>2</sup>, Виталий Петрович Егоров<sup>3</sup>  
<sup>1, 2, 3</sup> Чувашский государственный аграрный университет, Чебоксары, Россия

<sup>1</sup> smirnov\_p\_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6643-6657>

<sup>2</sup> sttmo@yandex.com, <https://orcid.org/0000-0001-7067-3583>

<sup>3</sup> evp121@mail.ru

**Аннотация.** Цель исследования – разработка укороченных дифференцированных севооборотов для крупных сельскохозяйственных предприятий с применением основ комбинаторики. Задачи исследования: 1) провести анализ на основе комбинаторики реализованных ранее трех- и четырехпольных севооборотов для мелкотоварного производства; 2) создать укороченные севообороты для крупных сельскохозяйственных предприятий с учетом использования разработанных органических удобрений. Внедрение плодосменных севооборотов является одним из эффективных агротехнологических методов восстановления и стабилизации плодородия почв и, как следствие, урожайности выращиваемых культур. При системном применении жидких и сжиженных форм навоза совместно с минимальным количеством минеральных удобрений и ядохимикатов севообороты диверсифицируются в пользу биологизации современного сельского хозяйства. Представлена информация о перспективных укороченных севооборотах в разрезе мирового сельского хозяйства и методики расчетов российских исследователей. Также показаны ранее разработанные авторами укороченные севообороты для аграрного мелкотоварного производства Чувашской Республики, которые оценены товаропроизводителями положительно. Предложена методика проектирования таблицы севооборотов посредством решения системы уравнений, получаемых суммированием аддитивных величин по строкам и столбцам с соблюдением последовательности размещения культур в севообороте. Представлены проекты пятипольного и шестипольного кормовых севооборотов. Из практического опыта применения жидких и сжиженных форм навоза установлено, что их воздействие на основные культуры севооборота составляет 2...3 года. Поэтому операция внесения органического удобрения распределена равномерно по годам с указанным промежутком. Между внесениями органических допускается внесение минимальной дозы минеральных удобрений. Расчеты просты и понятны для практического применения. Научная новизна исследования состоит в методике разработки дифференцированных укороченных севооборотов с применением основ комбинаторики. В предложенных севооборотах равномерно размещены годы и поля внесения жидких и сжиженных форм органических удобрений.

**Ключевые слова:** кормовой севооборот, чередование культур, укороченный севооборот, минимизация обработки почвы, внесение органических удобрений.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках плана-задания по заданию НИР МСХ РФ на 2024 год по теме: «Разработка технологии и системы машин для воспроизводства плодородия почв и повышения продуктивности сельскохозяйственных культур с использованием органоминеральных смесей».

**Для цитирования:** Смирнов П.А., Смирнов М.П., Егоров В.П. Проектирование укороченных дифференцированных севооборотов с применением основ комбинаторики // Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 2 (50). С. 3–10. EDN: EEEYZKF.

## Scientific article

## SHORTENED DIFFERENTIATED CROP ROTATIONS DEVELOPMENT USING THE BASICS OF COMBINATORICS

Pyotr A. Smirnov<sup>1</sup>, Michail P. Smirnov<sup>2</sup>, Vitaly P. Egorov<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russia

<sup>1</sup> smirnov\_p\_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6643-6657>

<sup>2</sup> sttmo@yandex.com, <https://orcid.org/0000-0001-7067-3583>

<sup>3</sup> evp121@mail.ru

**Abstract.** The purpose of the study is to develop shortened differentiated crop rotations for large-scale agricultural enterprises using the basics of combinatorics. Research objectives are 1) to carry out an analysis of previously implemented three- and four-field crop rotations for small-scale production based on combinatorics; 2) to develop shortened crop rotations for large-scale agricultural enterprises, taking into account application of formulated organic manure. Introduction of crop rotations is one of the effective agrotechnological methods to restore and stabilize soil fertility, and as a result, the yield of cultivated crops. With the systematic use of liquid and liquefied forms of manure, together with a minimum amount of mineral fertilizers and pesticides, crop rotations are diversified in favor of the biologization of present-day agriculture.

© Смирнов П.А., Смирнов М.П., Егоров В.П., 2024

The article presents information on promising shortened crop rotations in the context of world agriculture and calculation methods of Russian researchers. It also shows the shortened crop rotations previously developed by the authors for the agricultural small-scale production of the Chuvash Republic, which are evaluated positively by commodity producers. A method for developing a crop rotation table is proposed by solving a system of equations obtained by summing additive quantities in lines and columns in compliance with the sequence of crop placement in the crop rotation. The projects of five-field and six-field fodder crop rotations are presented. From the real-life experience of using liquid and liquefied forms of manure, it has been established that their effect on the main crops of crop rotation covers 2-3 years. Therefore, the operation of organic manure application is distributed evenly over the years with a specified interval. A minimum dose of mineral fertilizers is allowed between organic applications. The calculations are simple and comprehensible for practical use. The scientific novelty of the research consists in the methodology for differentiated shortened crop rotations development using the basics of combinatorics. In the proposed crop rotations, the years and fields of application of liquid and liquefied forms of organic manure are evenly distributed.

**Keywords:** fodder crop rotation, crop rotation, shortened crop rotation, minimization of tillage, application of organic manure.

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the task plan for the research work of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation for 2024 on the topic: «Development of technology and machine systems for reproducing soil fertility and increasing the productivity of agricultural crops using organomineral mixtures».

**For citation:** Smirnov P.A., Smirnov M.P., Egorov V.P. Shortened differentiated crop rotations development using the basics of combinatorics. Vestnik Kurganskoy GSHA. 2024; 2(50): 3–10. EDN: EEEYZK. (In Russ).

**Введение.** Правительством Российской Федерации утверждена «Стратегия развития производства органической продукции до 2030 года», согласно которой к 2030 году органическая продукция должна производиться на более 4,2 млн га посевных площадей, тогда как в 2021 году такие посевы занимали всего 656 тыс. га. Таким образом, к этому целевому показателю объем производства органической продукции для внутреннего рынка должен вырасти с 9,1 до 114,5 млрд руб. [1].

Базовое хозяйство для проведения исследований – закрытое акционерное общество «Прогресс» (ЗАО «Прогресс») Чебоксарского муниципального округа (МО) Чувашской Республики (ЧР) входит в объединение совместно с СХПК «Чурачикское», и является крупным производителем мяса (говядина, свинина) и молока в регионе, причем полностью использует корма собственного производства. Учитывая поголовье крупного рогатого скота (дойное стадо 650 голов), молодняка и поголовье свиней (10–11 тыс. голов), рациональная утилизация навоза на предприятии является одной из приоритетных. Для обеспечения животноводства собственными кормами в хозяйстве перешли на монокультуры в севообороте: озимая пшеница и яровая культура (пшеница, горох, кормовые бобы), кукуруза на силос, зерно и многолетние травы на сено и сенаж. Представленные наиболее урожайные культуры выращиваются с привлечением энергонасыщенных тракторов мощностью 180 л. с. и выше. Технологии преимущественно базируются на минимальной обработке почвы и «нулевого посева».

В связи с изложенным сформулирована цель исследования – разработка укороченных дифференцированных севооборотов для крупных сельскохозяйственных предприятий с применением основ комбинаторики. Для реализации цели сформулированы следующие задачи: 1) провести математический анализ на основе комбинаторики реализованных ранее трех- и четырехпольных севооборотов для мелкотоварного производства; 2) разработать укороченные севообороты для крупных сельскохозяйственных предприятий

с учетом использования собственных органических удобрений.

**Материалы и методы.** В исследованиях R. Holod, O. Bilinska, H. Shubala [2] проанализированы и раскрыты основные компоненты систем земледелия и их значение, современное состояние и научные принципы. Приведены результаты исследований по изучению продуктивности четырехпольных севооборотов с коротким циклом, причем отмечается, что элементы биологизации земледелия лежат в основе разработки таких севооборотов. Авторами сформулировано заключение о том, что при правильном построении коротких севооборотов решаются такие проблемы, как рациональное использование питательных веществ и влаги почвы, борьба с сорняками и вредителями сельскохозяйственных культур, улучшение физико-химических свойств почвы, повышение эффективности использования удобрений и техники [2].

В литературных источниках отмечается, что за последние несколько лет севооборотам уделяется существенное внимание, особенно с укороченным циклом, например, «яровая пшеница – полевая горох – ячмень – лен» или даже двупольным «кукуруза – соя» [3].

Kabita Kumari Shah с соавт. [4] утверждают, что внедрение диверсифицированной (замена минеральных удобрений органическими) системы земледелия и укороченных севооборотов, например, «кукуруза – соя – пшеница – овёс», «кукуруза – соя – пшеница», «кукуруза – соя – овёс», способствует поддержанию плодородия почвы при существенном сокращении использования минеральных удобрений [4]. Следует отметить, что именно диверсифицированные короткие севообороты представляются как сельскохозяйственные ресурсы будущего, в некоторых странах они выражены в ранге национальной политики производства сельскохозяйственных продуктов. Указывается, что при системном подходе и реализации севооборотов происходит восстановление плодородия почв, а для этого внедряются современные системы оценки и мониторинга земель [5–7].

Исследование севооборотов с учетом балан-

са гумуса и методов моделирования на его основе предложено Т. В. Маракаевой, Т. В. Ноженко, Е. В. Некрасовой [8], В. И. Будзко, В. И. Меденников [9]. Учеными рассмотрены только длинные севообороты, причем использование органических удобрений не изучалось. Но тенденции исследования по освоению укороченных севооборотов запущены в мелкотоварном производстве и уже внедряются в крупное аграрное производство. Таким образом, многопольные севообороты, разработанные в прошлом столетии [10], постепенно изживают себя. Вместо них предлагаются укороченные технологии, появились исследования по внедрению двупольных севооборотов [11].

Основные типы почв на территории ЗАО «Прогресс» и расположенных сельских поселениях (ЛПХ) светло-серые лесные. По механическому составу эти почвы тяжело-, средне-, легкосуглинистые. Объемная масса пахотного слоя в среднем составляет  $1,25 \pm 0,9$  г/см, к низу профиля увеличивается до  $1,49$  г/см<sup>3</sup>. Удельная масса равна  $2,41$ – $2,54$  г/см<sup>3</sup>. Общая скважность пахотного слоя составляет 48–52 %, к подпахотному горизонту она уменьшается до 39–44 %. Водопроницаемость светло-серых лесных почв невысокая, в среднем составляет 0,7 мм/мин. Данные агрохимических показателей свидетельствуют о том, что в пахотном слое содержится: гумуса – 2,4...2,6 %; поглощенных оснований – 30,6...39,8 мг-экв на 100 г почвы; подвижных фосфатов – 24,1...42,0 мг; обменного калия – 14,8 мг на 100 г почвы. Реакция среды – от слабокислого до нейтрального [12].

В исследуемом хозяйстве используются укороченные севообороты (таблица 1).

Таблица 1 – Укороченный севооборот (ЗАО «Прогресс»)

Год	Годы, культура		
	1-й год	2-й год	3-й год
1-й год	Оз. пшеница	Кукуруза	Яр. пшеница
2-й год	Кукуруза	Яр. пшеница	Оз. пшеница
3-й год	Яр. пшеница	Оз. пшеница	Кукуруза

Однако в связи с перепроизводством кормов в 2021–2022 годах с 2023 года начато использование севооборотов, в которых яровая культура заменена чистым паром (таблица 2).

Таблица 2 – Укороченный восстановительный севооборот (ЗАО «Прогресс»)

Поле	Годы, культура		
	1-й год	2-й год	3-й год
1-е поле	Оз. пшеница	Кукуруза	Чистый пар
2-е поле	Кукуруза	Чистый пар	Оз. пшеница
3-е поле	Чистый пар	Оз. пшеница	Кукуруза

В хозяйстве имеется в достаточном количестве сельскохозяйственной техники зарубежного и отечественного производства, причем на некоторых машинах установлены GPS- или ГЛОНАСС-навигация. Кукуруза выращивается по технологии «Strip-tilt», или минимальной энергосберегающей технологии [13].

В указанных севооборотах (таблицы 1 и 2) отсутствуют многолетние травы – основные источники грубых кормов для крупного рогатого скота. В хозяйствах объединения каждый год из севооборотов выводят поля под люцерну на 5...6 лет и формируют новый севооборот в составе из оставшихся участков и освобожденного поля из-под люцерны. Срок использования поля под люцерной зависит от вырождения культуры, то есть практически на четвертый-пятый год агрономическая служба вновь составляет тот или иной севооборот.

Нами был разработан трехпольный укороченный дифференцированный севооборот с полным циклом 9 лет для мелкотоварного производства (для КФХ и ЛПХ). Указанный севооборот применялся в конце 1990-х и в начале 2000-х годов, был направлен на производство картофеля, который массово выращивался в то время в Чувашской Республике. Одновременно обеспечивал кормами животных в ЛПХ [14].

Таблица 3 – Трехпольный укороченный дифференцированный севооборот с полным циклом 9 лет

Поле	Годы, культуры									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	1'-й
1-е поле	у1	у2	у1	у2	у1	у2	у1+у3	у3	у3	у1
2-е поле	у2	у1	у2	у1+у3	у3	у3	у1	у2	у1	у2
3-е поле	у1+у3	у3	у3	у1	у2	у1	у2	у1	у2	у3

Примечание: у1 – овес+вика на сено, у2 – картофель, у3 – клевер, у1+у2 – овес с подсевом многолетних трав

В результате внедрения трехпольного дифференцированного севооборота и ежегодного мониторинга объемной массы почвы установлено, что на участках под картофелем она находилась в пределах  $0,95$  г/см<sup>3</sup>, на участках вика с овсом –  $0,95$ ... $1,0$  г/см<sup>3</sup>, а за полных два года использования участка под клевером была в пределах  $1,28$  г/см<sup>3</sup>. Коэффициент удельного сопротивления почвы под клевером составил около 40 МПа, что позволило проводить основную обработку почвы на глубину до 24 см маломощным трактором, поверхностную и междурядную – тяжелым мотоблоком. В начальный период внедрения севооборота урожайность картофеля была

сравнима со средним значением по региону – 135–160 ц/га, к завершению цикла урожайность картофеля достигла максимальных значений: в 2012 г. – 320 ц/га, в 2013 г. – 308 ц/га. По сравнению с участками, на которых беспрерывно выращивался картофель, указанные показатели были выше 1,8–2,1 раза.

Но в 2005...2010 годах производство картофеля в стране было восстановлено, рыночный спрос на него снизился. В короткие сроки ЛПХ и мелкие КФХ региона переориентировались на производство молока и мяса. Потребовалось увеличение производства сена и замещение участка под картофелем кормовой свеклой. Для таких хозяйств нами был предложен четырехпольный укороченный дифференцированный севооборот с полным циклом 8 лет (таблица 4), где участки под кормами были увеличены вдвое [14]. Насыщение севооборота кормовой свеклой мотивировано необходимостью компенсировать отсутствие сочных кормов в зимнее время.

Таблица 4 – Четырехпольный укороченный дифференцированный севооборот с полным циклом 8 лет [14]

Поле	Годы, культуры								1'
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	
1-е поле	у1	у2	у1	у2	у1+у3	у3	у3	у3	у1
2-е поле	у2	у1	у2	у1+у3	у3	у3	у3	у1	у2
3-е поле	у1+у3	у3	у3	у3	у1	у2	у1	у2	у1+у3
4-е поле	у3	у3	у3	у1	у2	у1	у2	у1+у3	у3

Примечание: у1 – овес+вика на сено, у2 – кормовая свекла (картофель); у3 – травяная смесь (люцерна+клевер+костер+ежа сборная), у1+у3 – овес с подсевом травяной смеси считаем как у3

В указанном севообороте использовались жидкие и сжиженные формы навоза. Сжиженный бесподстилочный навоз влажностью 92 % вносится в подпахотный слой при основной обработке под кормовую свеклу в дозе 100...120 т/га [15; 16]. Далее производилась подкормка жидкой фракцией навоза в соотношении 1:4 с водой в междурядья кормовой свеклы, что способствовало увеличению урожайности до 100,8 т/га. Внесение под картофель указанных форм органических удобрений в общей дозе 180...200 т/га позволило увеличить урожайность до 565 ц/га [14; 17].

**Результаты исследований и их обсуждение.** Из комбинаторики известно [18], что максимальное возможное количество вариантов размещения, например, пятипольного севооборота, равно  $5!=120$ .

Следовательно, необходимы ограничивающие факторы для уменьшения количества вариантов.

Аддитивные величины в строке таблицы севооборота равны количеству годов полного цикла  $N$ , которая может быть выражена как:

$$k_1(y_1)+k_1(y_2)+\dots+k_2(y_n)=N, \quad (1)$$

где  $k_1$  – кратность чередования в севообороте

однолетних культур  $y_1, y_2, \dots$ , шт.;

$k_2$  – количество лет выращивания многолетней травы ( $y_n$ ) в цикле, шт.;

$n$  – количество участков в севообороте, шт.;

$p_1$  – количество полей (участков) под однолетними культурами в году, шт.;

$p_2$  – количество участков многолетних трав в году, шт.;

$N$  – количество годов в цикле севооборота, шт.;

Очевидны равенства по строкам таблицы:

$$N=k_1p_1+k_2p_2; \quad (2)$$

по столбцам таблицы севооборотов:

$$p=p_1+p_2. \quad (3)$$

В столбцах представлена плановая обеспеченность каждым кормом на год, выраженная обязательным наличием культур:

$$y_1+y_2+\dots+p_2 \text{ уп}=p. \quad (4)$$

Количество ступеней смещения между строками таблицы определяется отношением годов в цикле  $k$  к количеству полей (участков)  $n$  в выражении (5):

$$\frac{k_1(y_1)+k_1(y_2)+\dots+k_2(y_n)}{y_1+y_2+\dots+p_2 y_n} = k, \quad (5)$$

где  $y_1, y_2, \dots, y_{n-1}$  – единицы однолетних культур севооборота;

уп – многолетняя культура.

Или

$$\frac{N}{n} = k. \quad (6)$$

Последовательность чередования культур запишем в виде:

$$y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow \dots \rightarrow y_n. \quad (7)$$

Поскольку все выражения (1)...(7) связаны между собой, сведем их в систему (8):

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 y_1 + k_1 y_2 + \dots + k_2 y_n = N; \\ N = k_1 n_1 + k_2 n_2; \\ n = n_1 + n_2; \\ y_1 + y_2 + \dots + n_2 y_n = n; \\ \frac{k_1 y_1 + k_1 y_2 + \dots + k_2 y_n}{y_1 + y_2 + \dots + n_2 y_n} = k; \\ \frac{N}{n} = k; \\ y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow \dots \rightarrow y_n. \end{array} \right. \quad (8)$$

Для примера берем классический севопольный севооборот [11; 12], где основные элементы выражены как  $N=p=7$ ,  $k=1$ , то есть таблица севооборотов с точки зрения геометрии представлена квадратом с равенством строк и столбцов, причем выраженной последовательностью чередования культур.

Отсюда очевидно, что на укороченных севооборотах возможны варианты как  $N=2p$  или  $N=3p$ .

И при таких случаях на первое место выходит заявленная кормообеспеченность на каждый год (4) и последовательность плодосменного чередования культур (7).

В дифференцированном трехпольном севообороте с полным циклом в 9 лет реализованы следующие условия (таблица 3):

- в строках:  $3y_1+3y_2+3y_3=9$ ;
- в столбцах:  $y_1+y_2+y_3=3$ ;
- кратность:  $k=3$ ;
- последовательность:

$y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow y_3 \rightarrow y_3 \rightarrow y_3 \rightarrow \dots$  соблюдается.

Но в таком же четырехпольном кормовом севообороте (таблица 4) из-за равенства количества полей под однолетними культурами и многолетними возможны случаи  $y_1+y_1=2y_3$  или  $y_2+y_2=2y_3$  в столбцах, и таким образом, может возникнуть необеспеченность кормами  $y_2$  в первом и  $y_1$  во втором случае. Поэтому на 2-м поле (вторая строка) порядок севооборота сдвигается на один год относительно первого, на 3-м участке (третья строка) – на три года относительно второго. На 4-м поле (четвертая строка) сдвиг на год относительно третьего, четвертого и первого поля (строки) сдвинуты на три года. При этом обобщенная кратность в любом случае остается равной двум. Реализуются следующие условия:

- в строках:  $2y_1+2y_2+4y_3=8$ ;
- в столбцах:  $y_1+y_2+2y_3=4$ ;

- кратность:  $k=2$ , смещение в таблице на два года;

- последовательность:  
 $y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow y_1+y_3+\dots$  – соблюдается.

При разработке трехпольного и четырехпольного севооборотов было учтено, что основное удобрение в КФХ и ЛПХ – это органическое удобрение собственного хозяйства (перепревший навоз) [15]. На крупных аграрных предприятиях описанные варианты не приемлемы, поэтому предлагаются другие. Пятипольный укороченный дифференциальный севооборот с полным циклом 10 лет является продолжением почвозащитного кормового севооборота, рекомендованного еще в 1972 году: «травосмеси – травосмеси – озимая рожь – кукуруза – яровые культуры с подсевом трав» [10]. Указанный севооборот не соответствует современным требованиям. Во-первых, многолетние травы обладают ресурсом воспроизводства урожая не менее 4...6 лет, и этот аспект требует более полного использования. Во-вторых, озимая рожь в кормовых целях не используется, она замещается озимой пшеницей. Но такой севооборот не может быть реализован за пять лет, а, вероятно, только дифференцированным с полным циклом за десять лет (таблица 5). Севооборот составлен с учетом потребностей ЗАО «Прогресс» Чебоксарского МО и с внесением органических удобрений, произведенных в хозяйстве. Рекомендуемая доза разового внесения жидких и сжиженных форм органических удобрений в нижний пахотный или подпахотный слой до 100...140 т/га, поверхностно на многолетние травы – до 50...80 т/га. Выполнение условий севооборота:

- в строках:  $2y_1+2y_2+2y_3+ 4y_3=10$ ;
- в столбцах:  $y_1+y_2+y_3+ 2y_3=5$ ;
- кратность:  $k=2$ , смещение в таблице на два года;
- последовательность:  $y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow y_3 \rightarrow$

$y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow y_3 \rightarrow y_4+\dots$  – соблюдается.

Таблица 5 – Пятипольный укороченный дифференциальный севооборот с полным циклом 10 лет с внесением жидких и сжиженных форм навоза

Поле	Годы, культуры										
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й	1'-й
1-е поле	$y_1$	$y_2$	$y_3$ ☺	$y_1$	$y_2$ ☺	$y_3+y_4$	$y_4$	$y_4$ ☺	$y_4$	$y_4$ ☺	$y_1$
2-е поле	$y_3$ ☺	$y_1$	$y_2$ ☺	$y_3+y_4$	$y_4$	$y_4$ ☺	$y_4$	$y_4$ ☺	$y_1$	$y_2$	$y_3$
3-е поле	$y_2$ ☺	$y_3+y_4$	$y_4$	$y_4$ ☺	$y_4$	$y_4$ ☺	$y_1$	$y_2$	$y_3$ ☺	$y_1$	$y_2$
4-е поле	$y_4$	$y_4$ ☺	$y_4$	$y_4$ ☺	$y_1$	$y_2$	$y_3$ ☺	$y_1$	$y_2$ ☺	$y_3+y_4$	$y_4$
5-е поле	$y_4$	$y_4$ ☺	$y_1$	$y_2$	$y_3$ ☺	$y_1$	$y_2$ ☺	$y_3+y_4$	$y_4$	$y_4$ ☺	$y_4$

Примечание:  $y_1$  – озимая пшеница,  $y_2$  – кукуруза;  $y_3$  – яровая культура (пшеница, ячмень, горох);  $y_4$  – клевер+плющерна (травяная смесь),  $y_3+y_4$  – яровая культура с подсевом многолетних трав, считаем как  $y_3$ , ☺ – культуры, после которых вносятся жидкие и сжиженные формы навоза, причем на многолетние травы поверхностно.

Но равномерное внесение жидких и сжиженных органических удобрений в пятипольном севообороте (таблица 5) не удастся из-за дробного числа кратности:

$$k = \frac{N}{3} = 3,33 \text{ или } k = \frac{N}{4} = 2,50.$$

В таких случаях следует ориентироваться на равномерное по годам внесение органических удобрений: на каждый год предлагается вносить на два поля (таблица 5).

Разработанный шестипольный севооборот представлен в таблице 6 со следующими условиями:

- в строках:  $2y_1+2y_2+2y_3+ 6y_3=12$ ;
- в столбцах:  $y_1+y_2+y_3+ 3y_3=6$ ;
- кратность:  $k=2$ , смещение в таблице на два года;
- последовательность:  $y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow y_3 \rightarrow y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow y_3 \rightarrow y_4 + \dots$  – соблюдается.

На шестой год (12-й по таблице 6) скашивается только первый укос многолетних трав, затем сразу производится химическое уничтожение всех растений, дискуется и вносится в подпахотный горизонт жидкий или сжиженный навоз [15; 16], т. е. таким образом, создается укороченный чистый пар сроком 2,5–3 месяца. Далее на участке высевается озимая пшеница. Рекомендуются ранней весной внесение на многолетние травы жидких форм навоза поверхностно (разливом). Внесение органических удобрений также равномерно распределено по годам: вносятся на два поля севооборота.

Из приведенных расчетов в системе уравнений (8) основными являются уравнения (1), (4), (5)

и (6), остальные – дублирующие и служат для контроля.

**Заключение.** На основе разработанных и внедренных трех- и четырехпольных севооборотов, которые используются для мелкотоварных агрохозяйств, предлагается методика расчета укороченных кормовых севооборотов, используемых в производстве крупных сельскохозяйственных предприятий. Приведены оптимальные варианты пятипольного и шестипольного кормовых дифференцированных севооборотов. Предлагается в севооборотах равномерное распределение сроков внесения жидких и сжиженных форм органических удобрений.

#### Список источников

1. Стратегия развития производства органической продукции в Российской Федерации до 2030 года: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 04.07.2023 № 1788-р [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/8tJynEn7pLVLFdqQL6p3BhArPtCQW9Aw.pdf> (дата обращения: 29.01.2024).

2. Holod R., Bilinska O., Shubala H. The efficiency of the crop rotations with short rotation with different levels of their saturation of cereals and crops in the conditions of Western Forest-Steppe // Interdepartmental thematic scientific collection «Agriculture». 2017. No 1(92). Pp. 62-68. DOI: 10.31073/zem.92.62-68.

3. Weisberger D.A., McDaniel M.D., Arbuckle J.G., Liebman M. Farmer perspectives on benefits of and barriers to extended crop rotations in Iowa, USA // Agricultural and

Таблица 6 – Шестипольный укороченный дифференцированный севооборот с полным циклом 12 лет с внесением жидких и сжиженных форм навоза

Поле	Годы, культуры												
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й	11-й	12-й	1'-й
1-поле	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub> ☺	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub> ☺	y <sub>3</sub> +y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> ☺	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> ☺	y <sub>1</sub>
2-поле	y <sub>3</sub> ☺	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub> ☺	y <sub>3</sub> +y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> ☺	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> ☺	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub> ☺
3-поле	y <sub>2</sub> ☺	y <sub>3</sub> +y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> ☺	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> ☺	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub> ☺	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub> ☺
4-поле	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> ☺	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> ☺	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub> ☺	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub> ☺	y <sub>3</sub> +y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>
5-поле	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> ☺	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub> ☺	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub> ☺	y <sub>3</sub> +y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> ☺	y <sub>4</sub>
6-поле	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> ☺	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub> ☺	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub> ☺	y <sub>3</sub> +y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> ☺	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>

Примечание: y<sub>1</sub> – озимая пшеница, y<sub>2</sub> – кукуруза; y<sub>3</sub> – яровая культура (пшеница, ячмень, горох); y<sub>4</sub> – люцерна (травяная смесь, y<sub>3</sub>+y<sub>4</sub> – яровая культура с подсевом многолетних трав считаем как y<sub>3</sub>, ☺ – культуры, после которых вносятся жидкие и сжиженные формы навоза, причем на многолетние травы поверхностно.

Environmental Letters. 2021. No 6. P. 20049. DOI: 10.1002/ael2.20049.

4. Diversified Crop Rotation: An Approach for Sustainable Agriculture Production / Kabita Kumari Shah [et al.] // *Advances in Agriculture*. 2021. Article ID 8924087. DOI: 10.1155/2021/8924087.

5. Tahat M.M., Alananbeh K.M., Othman Y.A., Leskovar D.I. Soil health and sustainable agriculture//*Sustainability*. 2020. Vol. 12. No. 12. P. 4859. DOI: 10.3390/su12124859.

6. Assessment and monitoring of soil degradation during land use change using multivariate analysis / Y. Khaledian [et al.] // *Land Degradation and Development*. 2017. Vol. 28. No. 1. Pp. 128-141. DOI: 10.1002/ldr.2541.

7. Lai R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation // *Sustainability*. 2015. Vol. 7. No. 5. Pp. 5875-5895. DOI: 10.3390/su7055875.

8. Маракаева Т.В., Ноженко Т.В., Некрасова Е.В. Организация систем севооборотов с учетом баланса гумуса на основе экономико-математического моделирования // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2017. № 8(154). С. 63-67. EDN: YYZFNX.

9. Будзко В.И., Меденников В.И. Математическая модель оптимизации структуры севооборотов на основе единой цифровой платформы управления сельскохозяйственным производством // *Системы высокой доступности*. 2022. Т. 18. № 4. С. 5-15. DOI: 10.18127/j20729472-202204-01. EDN: RPXYGA.

10. Справочник агронома Нечерноземной зоны / В.С. Алексашова [и др.]. М.: Агропромиздат, 1990. 575 с.

11. Карпухин М.Ю. Двупольный интенсивный севооборот для выращивания картофеля на Среднем Урале // *Аграрный вестник Урала*. 2009. № 12(66). С. 45-47. EDN: LALSUF.

12. Мониторинг земель сельскохозяйственного назначения Чувашской Республики. Чебоксары: РИО Чувашской госсельхозакадемии, 2005. 123 с.

13. Оптимизация подготовки почвы под посев пропашных культур / П.А. Смирнов [и др.] // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2018. Т. 13. № 4(51). С. 124-129. DOI: 10.12737/article\_5c3de343da23a8.16471048. EDN: YWHBZB.

14. Смирнов П.А., Прокопьева Е.В., Смирнов М.П. Результаты использования дифференцированного четырехпольного севооборота в мелкотоварном производстве // *Вестник Чувашской государственной сельскохозяй-*

*ственной академии*. 2019. № 4(11). С. 65-70. DOI: 10.17022/abch-2r15. EDN: DAAAKN.

15. Энергосберегающая подготовка почвы под посадку хмеля / П.А. Смирнов [и др.] // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 16. № 4(64). С. 68-74. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-68-74. EDN: BIVSUI.

16. Моделирование массопереноса в почве с уплотненным слоем в процессе утилизации сжиженного бесподстилочного навоза / П.А. Смирнов [и др.] // *Вестник Курганской ГСХА*. 2023. № 3(47). С. 82-89. EDN: YZRMUN.

17. Постовалов А.А., Суханова С.Ф. Влияние факторов внешней среды на устойчивость к болезням и урожайность гороха // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. № 4(56). С. 96-101. DOI: 10.18286/1816-4501-2021-4-96-101. EDN: NJLTUR.

18. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: учебное пособие для втузов. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 608 с.

## References

1. Strategiya razvitiya proizvodstva organicheskoi produktii v Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda [Development strategy for the production of organic products in the Russian Federation until 2030]: rasporyazhenie Pravitel'stva Ros. Federatsii ot 04.07.2023 № 1788-r [Internet]. URL: <http://static.government.ru/media/files/8tJynEn7pLVLfddqL6p3BhArPtCQW9Aw.pdf> (accessed: 29.01.2024).

2. Holod R., Bilinska O., Shubala H. The efficiency of the crop rotations with short rotation with different levels of their saturation of cereals and crops in the conditions of Western Forest-Steppe. *Interdepartmental thematic scientific collection «Agriculture»*. 2017; 1(92): 62-68. DOI: 10.31073/zem.92.62-68.

3. Weisberger D.A., McDaniel M.D., Arbuckle J.G., Liebman M. Farmer perspectives on benefits of and barriers to extended crop rotations in Iowa, USA. *Agricultural and Environmental Letters*. 2021; (6): 20049. DOI: 10.1002/ael2.20049.

4. Kabita Kumari Shah et al. Diversified Crop Rotation: An Approach for Sustainable Agriculture Production. *Advances in Agriculture*. 2021; 8924087. DOI: 10.1155/2021/8924087.

5. Tahat M.M., Alananbeh K.M., Othman Y.A., Leskovar D.I. Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*. 2020; 12(12): 4859. DOI: 10.3390/su12124859.

6. Khaledian Y. et al. Assessment and monitoring of soil degradation during land use change using multivariate analysis. *Land Degradation and Develop-*

ment. 2017; 28(1): 128-141. DOI: 10.1002/ldr.2541.

7. Lal R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*. 2015; 7(5): 5875-5895. DOI: 10.3390/su7055875.

8. Marakaeva T.V., Nozhenko T.V., Nekrasova E.V. Organizatsiya sistem sevooborotov s uchetom balansa gumusa na osnove ekonomiko-matematicheskogo modelirovaniya [Organization of crop rotation systems taking into account humus balance based on economic and mathematical modeling]. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2017; 8(154): 63-67. EDN: YYZFNX. (In Russ).

9. Budzko V.I., Medennikov V.I. Matematicheskaya model' optimizatsii struktury sevooborotov na osnove edinoi tsifrovoi platformy upravleniya sel'skokhozyaistvennym proizvodstvom [Mathematical model for optimizing the structure of crop rotations based on a unified digital platform for managing agricultural production]. *Highly available systems*. 2022; 18(4): 5-15. DOI: 10.18127/lj20729472-202204-01. EDN: RPXY-GA. (In Russ).

10. Aleksashova V.S. et al. *Spravochnik agronoma Nechernozemnoi zony* [Directory of agronomist of the Non-Chernozem Zone]. M.: Agropromizdat; 1990. (In Russ).

11. Karpukhin M.Yu. Dvupol'nyi intensivnyi sevooborot dlya vyrashchivaniya kartofelya na Srednem Urale [Two-field intensive crop rotation for growing potatoes in the Middle Urals]. *Agricultural Bulletin of the Ural*. 2009; 12(66): 45-47. EDN: LALSYF. (In Russ).

12. *Monitoring zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya Chuvashskoi Respubliki* [Monitoring of agricultural lands in the Chuvash Republic]. Cheboksary: RIO Chuvashskoi gossel'khozakademii; 2005. (In Russ).

13. Smirnov P.A. et al. Optimizatsiya podgotovki pochvy pod posev propashnykh kul'tur [Optimization of soil preparation for sowing row crops]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2018; 13(4-51): 124-129. DOI: 10.12737/article\_5c3de343da23a8.16471048. EDN: YWHBZB. (In Russ).

14. Smirnov P.A., Prokopyeva E.V., Smirnov M.P. Rezul'taty ispol'zovaniya differentsirovannogo chetyrekhpol'nogo sevooborota v melkotovarnom proizvodstve [Results of using differentiated four-field crop rotation in small-scale production]. *Vestnik Chuvashskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*. 2019; 4(11): 65-70. DOI: 10.17022/abch-2r15. EDN: DAAAKN. (In Russ).

15. Smirnov P.A. et al. Energosberegayushchaya podgotovka pochvy pod posadku khmelya [Energy-saving soil preparation for planting hops]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2021; 16(4-64): 68-74. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-68-74. EDN: BIVSUI. (In Russ).

16. Smirnov P.A. et al. Modelirovanie massop-erenosa v pochve s uplotnennym sloem v protsesse utilizatsii szhizhennogo bespodstilochnogo navoza [Modeling of mass transfer in soil with a hardpan when utilizing liquied manure]. *Vestnik Kurganskoy GSXA*. 2023; 3(47): 82-89. EDN: YZRMUN. (In Russ).

17. Postovalov A.A., Sukhanova S.F. Vliyaniye faktorov vneshnei sredy na ustoichivost' k boleznyam i urozhainost' gorokha [The influence of environmental factors on disease resistance and pea yield]. *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2021; 4(56): 96-101. DOI: 10.18286/1816-4501-2021-4-96-101. EDN: NJL-TUR. (In Russ).

18. Bronshtein I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and college students]: uchebnoe posobie dlya vtuzov. Sankt-Peterburg: Lan'; 2022. (In Russ).

#### Информация об авторах

П.А. Смирнов – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 438540.

М.П. Смирнов – кандидат технических наук; AuthorID 981963.

В.П. Егоров – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 317341.

#### Information about the author

P.A. Smirnov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 438540.

M.P. Smirnov – Candidate of Technical Sciences; AuthorID 981963.

V.P. Egorov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 317341.

Статья поступила в редакцию 22.02.2024; одобрена после рецензирования 05.03.2024; принята к публикации 13.06.2024.

The article was submitted 22.02.2024; approved after reviewing 05.03.2024; accepted for publication 13.06.2024.