

АЛГОРИТМ И МОДЕЛИ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ АГРОЭКОСИСТЕМЫ

Важнейшей задачей рационального земледелия и агроэкологии является прогнозирование состояния агроэкосистем (урожайности культур, экономической эффективности сельскохозяйственного производства, качества продукции, плодородия почвы) при различных значениях антропогенных факторов земледелия (удобрения, обработка почвы). По результатам прогнозов разрабатывают рекомендации оптимального управления технологическими процессами в земледелии. Анализ литературы [1,2,3,4,5] показывает, что существующие модели прогнозирования состояния агроэкосистем (балансовые модели, регрессионные модели, комплексные имитационные модели) имеют частный узконаправленный характер. Это проявляется в том, что агрономические и экологические задачи решаются отдельно, без учета их взаимосвязи в рамках единого технологического процесса. Кроме того, фактор погодных условий учитывается недостаточно полно. Как правило, прогнозы урожайности сельскохозяйственных культур разрабатываются исходя из средних типовых погодных условий. Потребности практики определяют необходимость одновременного достижения устойчивой урожайности культур севооборота при различных погодных условиях, высокой рентабельности сельскохозяйственного производства и сохранения плодородия почвы. Вышеприведенные рассуждения определяют необходимость разработки комплексных моделей, включающих следующие элементы:

- 1) базы данных урожайности культур, плодородия почвы, погодных условий;
- 2) регрессионные модели урожайности культур и плодородия почвы;
- 3) экономико-математические модели рентабельности сельскохозяйственного производства;
- 4) имитационные модели, описывающие чередование культур севооборота и погодные условия.

Рассмотрим основные элементы разработки комплексной модели агроэкосистемы, предназначенной для прогнозирования урожайности,

рентабельности производства сельскохозяйственных культур при условии сохранения плодородия почвы.

На Льговской опытно-селекционной станции проводились полевые опыты, изучающие влияние вносимых удобрений на урожайность культур севооборота и содержание гумуса в почве. При этом рассматривался следующий десятипольный севооборот: вико-овес, озимая пшеница, сахарная свекла, ячмень, клевер, озимая пшеница, сахарная свекла, горох, озимая рожь, кукуруза.

По результатам мониторинга агроэкосистемы созданы базы данных, содержащие информацию об урожайности культур, содержании гумуса в почве на начала ротаций при различных вариантах вносимых удобрений, а также погодных условиях (осадках и температуре).

Для оценки влияния погодных условий на урожайность культур выбран гидротермический коэффициент (ГТК), учитывающий такие важные для управления состоянием агроэкосистемы факторы как сумму осадков и сумму температур выше 10 °С., взятые за период вегетации.

С помощью критерия Неймана-Пирсона доказано, что случайная величина ГТК может быть описана нормальным законом распределения, так как расчетное значение λ^2 при этом оказалось меньше предельно допустимого теоретического $\lambda^2_{пр}$ при 5 % уровне значимости. Определены параметры законов распределения ГТК для различных культур (например для клевера и сахарной свеклы математическое ожидание равно 1,35, среднее квадратическое отклонение равно 0,5).

На основании исходных данных полевых опытов разработаны регрессионные модели зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от количества вносимых минеральных и органических удобрений, а также погодных условий.

Для примера приведем модель урожайности сахарной свеклы, выполненную по активному полнофакторному плану эксперимента 3*3*2:

$$Y_3 = 34,32 \cdot x_1 + 59,88 \cdot x_2 + 23,27 \cdot x_3 + 21,52 \cdot x_1^2 - 24,82 \cdot x_2^2 - 2,52 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,03 \cdot x_1 \cdot x_3 - 12,79 \cdot x_2 \cdot x_3 + 333,88 \quad (1)$$

Здесь Y_3 – урожайность сахарной свеклы (ц/га), x_1 – фактор погодных условий, выраженный через гидротермический коэффициент за вегетационные периоды культур, x_2 , x_3 – факторы минеральных и

органических удобрений (в дозах). Три уровня по фактору x_1 соответствуют трем типам погодных условий (жаркая, средняя, холодная погода), по фактору x_2 – 0, 1, 2 дозам минеральных удобрений, x_3 – 0, 1 дозам органических удобрений. Одна доза удобрений означает внесение 22 кг д. в. азота, 15 кг д. в. фосфора, 26 кг д. в. калия, 4 т навоза на 1 га в среднем по культурам.

Для оценки плодородия почвы разработана регрессионная модель зависимости изменения содержания гумуса в почве от количества вносимых удобрений.

$$\Delta Y_G = 0,127 \cdot x_2 + 0,396 \cdot x_3 - 0,9 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,622 \quad (2)$$

Здесь ΔY_G – изменение содержания гумуса в почве за период ротации (10 лет).

Для оценки экономической эффективности системы разработаны математические модели рентабельности производства культур севооборота.

Например, для озимой пшеницы модель рентабельности имеет вид:

$$R_2 = \left(\frac{C_{ур2} \cdot Y_2}{C_{62} + C_{уб.2} \cdot (Y_2 - Y_{62}) + C'_2} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (3)$$

$$C'_2 = \frac{20}{K_N} \cdot X_2 \cdot (C_{уд.ед.N} + C_{погр.ед.мин} + 0,1 \cdot C_{ед.пер} \cdot S_{мин})$$

$$+ \frac{15}{K_P} \cdot X_2 \cdot (C_{уд.ед.p} + C_{погр.ед.мин} + 0,1 \cdot C_{ед.пер} \cdot S_{мин}) + \frac{25}{K_K} \cdot$$

$$X_2 \cdot (C_{уд.ед.k} + C_{погр.ед.мин} + 0,1 \cdot C_{ед.пер} \cdot S_{мин}) + C_{вн.мин.},$$

где R_2 – рентабельность производства озимой пшеницы; $C_{ур2}$ – цена реализации 1ц урожая; Y_2, Y_{62} – урожайность озимой пшеницы при рассматриваемом варианте внесения удобрений и при варианте абсолютный контроль (без удобрений); C_{62} – материально-денежные затраты при варианте абсолютный контроль; C'_2 – материально-денежные затраты, связанные с приобретением, погрузкой, перевозкой, внесением удобрений; $C_{уб.2}$ – стоимость уборки 1 ц урожая озимой пшеницы; $C_{уд.ед.N}$, $C_{уд.ед.p}$, $C_{уд.ед.k}$ – стоимость 1 ц азотных, фосфорных, калийных удобрений; $C_{погр.ед.мин}$ – стоимость погрузки 1 ц минеральных удобрений; $C_{ед.пер}$ – цена 1 т/км перевозки; $C_{вн.мин.}$ – стоимость внесения минеральных удобрений на 1 га площади; $S_{мин}$ –

расстояние (в км) от складов минеральных удобрений до полей; Кп, Кр, Кк - процент действующего вещества в используемых азотных, фосфорных, калийных удобрениях.

На основе объединения результатов ранее проведенных исследований разработан имитационный алгоритм, описывающий функционирование агроэкосистемы во времени. Он учитывает порядок чередования культур в севообороте, законы распределения случайной величины ГТК, характеризующей погодные условия, а также включает в себя аналитические модели урожайности и рентабельности сельскохозяйственных культур. В основу разработки имитационного алгоритма положен подход, заключающийся в определении последовательных состояний системы через некоторые интервалы времени Δt , где $\Delta t=1$ год.

На вход моделирующего алгоритма поступает следующая информация: экономические данные, диапазоны урожайности сельскохозяйственных культур, стратегии управления количеством вносимых минеральных и органических удобрений, приводящие к стабилизации гумуса.

На выходе алгоритма рассчитываются следующие величины:

- средние урожайности культур севооборота;
- процентное соотношение урожая, попавших в заданный диапазон, выше и ниже заданного диапазона;
- средние рентабельности производства культур севооборота.

Алгоритм имитационной модели агроэкосистемы представлен на рис 1.

Ниже приводится описание назначения основных блоков алгоритма.

1. Вводится таблица чисел нормального закона распределения с параметрами $M_b = 0$ (математическое ожидание) и $\sigma_b = 1$ (среднее квадратическое отклонение).

2. Вводится начальное значение гумуса $Y_{г.о} = 4,58\%$.

3. Выполняется ввод данных в диалоговом режиме:

а) экономических показателей (стоимость удобрений, стоимость погрузки удобрений, цена 1 т/км перевозки, расстояние от складов удобрений до полей, затраты на абсолютный контроль, цена реализации, стоимость уборки 1ц. урожая сельскохозяйственных культур.);

б) диапазонов заданной урожайности сельскохозяйственных культур.

4. Вводится вариант вносимых минеральных и органических удобрений.

5. Присваиваются начальные значения переменным Π , JJ , где Π - порядковый номер ротации в прогнозе, JJ - номер текущего года в ротации.

6. Проверяется условие окончания времени прогноза (100 лет), то есть выполнения неравенства $\Pi \leq 10$.

7. Проверяется условие окончания текущей ротации, то есть выполнения неравенства $JJ \leq 10$.

8. По номеру года в ротации (JJ) определяется текущая культура.

9. Формируется ГТК за вегетационный период культуры и по нему определяется тип погодных условий.

При этом выполняются следующие действия:

а) выбирается очередное значение из таблицы чисел нормального закона распределения с параметрами $Mб = 0$, $\sigmaб = 1$. Обозначим его через ГТКб;

б) формируется значение ГТК за вегетационный период текущей культуры севооборота по следующей формуле :

$$\text{ГТК} = \text{ГТКб} \cdot \sigma + M, \quad (4)$$

где σ и M - параметры закона распределения ГТК для текущей культуры. Для различных культур севооборота формула принимает следующий вид:

$$\text{ГТК} = \text{ГТКб} \cdot 0,5 + 1,35, \quad (5)$$

для вико-овса, ячменя, гороха, озимых -

$$\text{ГТК} = \text{ГТКб} \cdot 0,63 + 1,4, \quad (6)$$

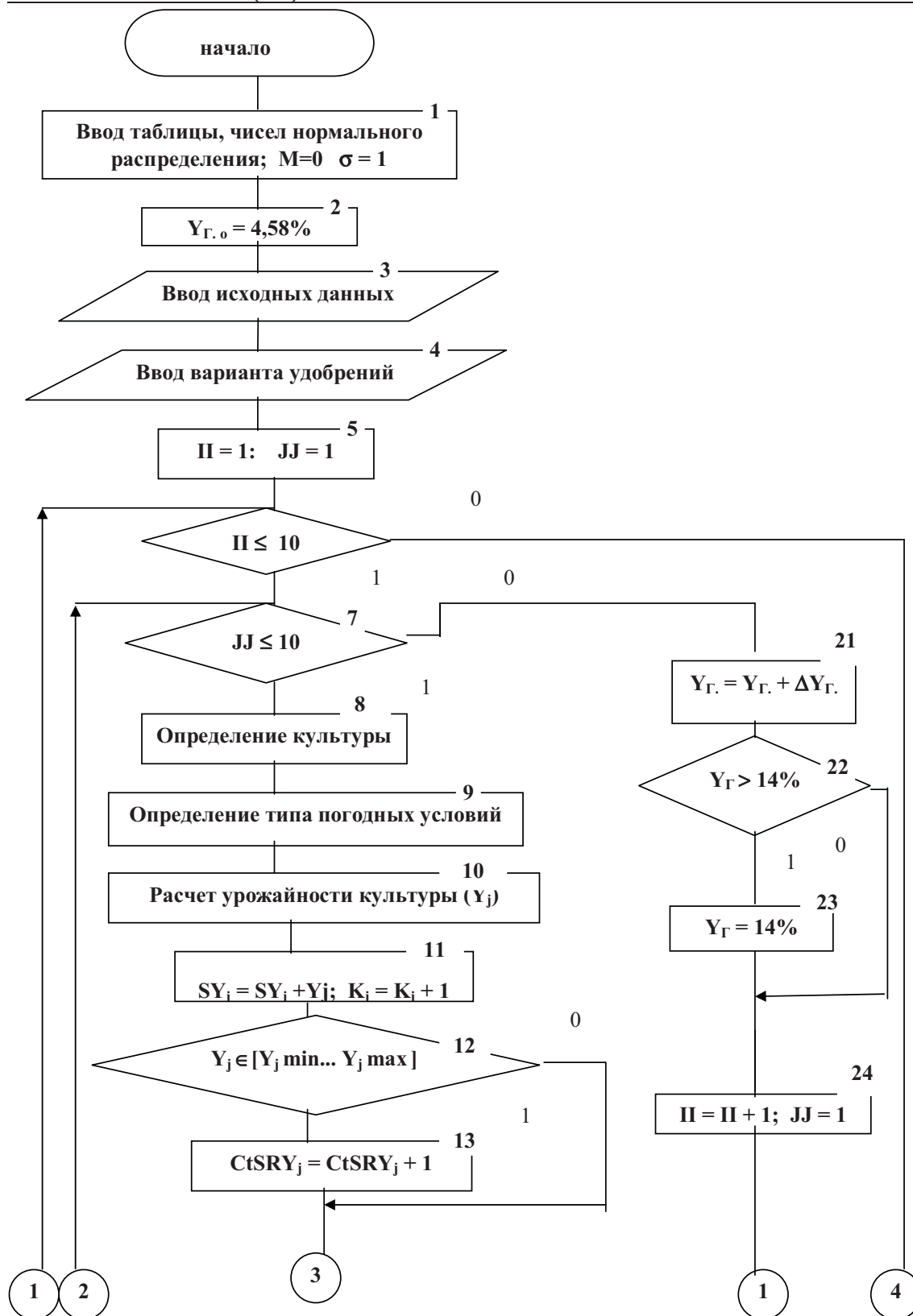
для кукурузы -

$$\text{ГТК} = \text{ГТКб} \cdot 0,48 + 1,28. \quad (7)$$

в) По значению ГТК и виду культуры определяется тип погодных условий.

10. Выполняется расчет урожайности текущей культуры по регрессионной модели.

11. Моделируется накопление суммарной урожайности по текущей культуре SY_j и количества проходов культуры во время прогноза K_j .



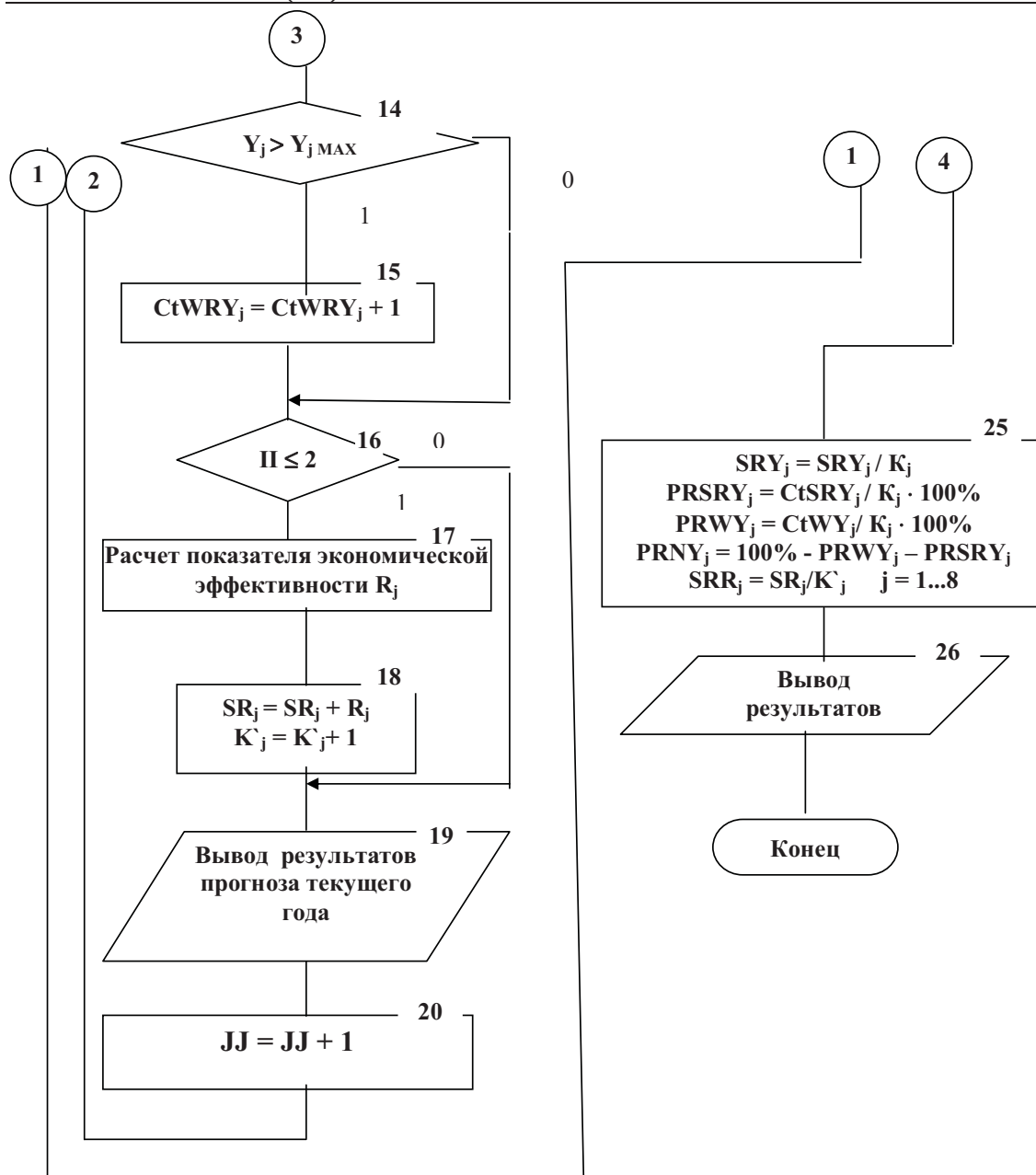


Рисунок 1 – Алгоритм имитационной модели агроэко системы для сахарной свеклы, клевера -

12. Проверяется условие, принадлежит ли урожайность культуры диапазону средних урожаев: $Y_j \in [Y_{jMIN} \dots Y_{jMAX}]$, где $Y_{jMIN} \dots Y_{jMAX}$ границы этого диапазона.

13. Увеличивается значение счетчика количества средних урожаев по j -ой культуре $CtSRY_j$.

14. Проверяется условие, является ли урожайность культуры высокой: $Y_j \geq Y_{jMIN}$.

15. Увеличивается значение количества высоких урожаев по j -ой культуре $CtWY_j$.

16. Проверяется условие окончания времени экономического прогноза (20 лет). Для этого необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$\Pi \leq 2.$$

17. Выполняется расчет рентабельности производства культуры.

18. Моделируется накопление суммарной экономической эффективности (SR_j), увеличение счетчика экономических прогнозов (k'_j) по j -ой культуре.

19. Выводятся результаты прогноза текущего года: номер года, культура, ГТК, тип погодных условий, урожайность культуры и рентабельность сельскохозяйственного производства при условии $\Pi < 2$

20. Происходит переход к следующему году севооборота.

21. По истечении ротации увеличивается содержание гумуса на величину ΔY_r , заданную при постановке задачи управления.

22,23) В данных блоках алгоритма учитывается количество гумуса в почве, которое не может превышать определенного максимально возможного предела. Анализ литературы [1] показывает, что этот предел приблизительно равен 14%.

24. Происходит переход к новому севообороту.

25. Рассчитываются следующие величины:

- средние урожайности культур севооборота, по формуле

$$SRY_j = SY_j / K'_j \quad (8)$$

- процентное соотношение урожаев, попавших в диапазон, заданный пользователем модели, а также выше и ниже данного диапазона по формулам :

$$PRSRY_j = CtSRY_j / K_j \cdot 100\%, \quad (9)$$

$$PRWY_j = CtWY_j / K_j \cdot 100\% \quad (10)$$

$$PRNY_j = 100\% - PRWY_j - PRSRY_j \quad (11)$$

- среднее значение показателей экономической эффективности агроэкосистемы по формуле :

$$SRYR_j = SR_j / k'_j \quad (12)$$

26. Выводятся результаты прогноза:

- содержание гумуса через каждые 10 лет в течении всего времени прогноза;

- величины, рассчитанные в блоке №25 данного алгоритма.

На основе регрессионной модели плодородия почвы и имитационной модели агроэкосистемы обеспечивается возможность решения задач прогнозирования урожайности и рентабельности сельскохозяйственных культур в режимах стабилизации и расширенного воспроизводства гумуса.

В случае решения задачи стабилизации гумуса в алгоритме отсутствуют блоки 2, 21, 22, 23, описывающие процесс изменения плодородия почвы во времени.

На основе имитационной модели, проведено прогнозирование средней за длительный период времени урожайности и рентабельности производства сельскохозяйственных культур, а также статистической частоты попадания урожайности культур в диапазоны высоких, средних и низких урожаев. Диапазоны средних урожаев для наиболее важных сельскохозяйственных культур представлены в таблице 1. Высокими и низкими считаются те урожаи, которые находятся соответственно выше и ниже диапазона средних урожаев.

Результаты прогнозов урожайности и рентабельности производства для наиболее важных сельскохозяйственных культур представлены в таблицах 2,3.

Таблица 1

Границы диапазонов урожайности культур

Культура	Границы диапазонов урожайности (ц/га)	
	Левая	Правая
Озимая пшеница	32	40
Сахарная свекла	300	380
Озимая рожь	32	40

На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по внесению удобрений, обеспечивающие запланированную урожайность культур, достаточно высокую экономическую эффективность сельскохозяйственного производства и сохранение гумуса в почве.

Так, например, для достижения максимальной урожайности сахарной свеклы (411 ц/га) при ограничениях на устойчивую урожайность других культур севооборота, рентабельность производства выше 75% и сохранение плодородия почвы можно рекомендовать внесение 1,9 доз минеральных удобрений и 1,692 доз органических удобрений.

Средние урожайности и рентабельности сельскохозяйственных культур

Культура	Минеральные удобрения (в дозах)	Органические удобрения (в дозах)	Средняя урожайность (ц/га)	Средняя рентабельность (%)
Озимая пшеница	0	1,571	32,3	99,4
Озимая пшеница	1	1,618	37,4	109,5
Озимая пшеница	2	1,704	40,6	109,7
Озимая пшеница	3	1,913	41,9	102,5
Сахарная свекла	0	1,571	347	103
Сахарная свекла	1	1,618	394	105,9
Сахарная свекла	2	1,704	411	95,1
Сахарная свекла	3	1,913	393	70,6
Озимая рожь	0	1,571	33	74,1
Озимая рожь	1	1,618	38,2	83,5
Озимая рожь	2	1,704	40,8	81,4
Озимая рожь	3	1,913	40,4	69,4

Таблица 3

Статистические частоты высоких, средних и низких урожаев

Культура	Диапазон минеральных удобрений (в дозах)	Статистические частоты урожаев (%):		
		высоких	средних	низких
Озимая пшеница	0-0,1	0	80	20
Озимая пшеница	0,2-1,3	0	100	0
Озимая пшеница	1,4-1,5	45	55	0
Озимая пшеница	1,6-3,2	65	35	0
Сахарная свекла	0-0,9	35	65	0
Сахарная свекла	1,0-1,3	70	30	0
Сахарная свекла	1,4-3,0	100	0	0
Сахарная свекла	3,1-3,2	35	65	0
Озимая рожь	0-0,5	0	60	40
Озимая рожь	0,6-0,7	10	50	40
Озимая рожь	0,8-3,2	60	40	0

Итак, в результате проведенных исследований разработаны алгоритм и модели для прогнозирования эффективности эксплуатации

агроэкосистемы в условиях экологического равновесия (стабилизации гумуса).

В отличие от существующих методов моделирования агропроцессов, разработанный комплекс моделей более полно и объективно учитывает влияние фактора погодных условий на урожайность культур и позволяет одновременно обеспечить достижение устойчивой урожайности культур севооборота, достаточно высокой рентабельности сельскохозяйственного производства и сохранения плодородия почвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Докучаев . В. В. Русский чернозем. М., Сельхозгиз. 1952. – 636 с.
2. Шатилов И.С., Чудновский А.Ф. Агрофизические, агрометеорологические основы программирования урожая. - Л.: Гидрометеиздат, 1980.-320 с.
3. Образцов А.С. Системный метод: применение в земледелии.-М.: Агропромиздат, 1990 - 303 с.
4. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта.- М.: Агропромиздат, 1985.- 351 с.
5. Державин Л.М., Рубанов И.А. Вид и анализ производственной функции «урожай-удобрение»//Агрохимия.1975.-№4.-С.124-130.