

Мониторинг данных неоднородности земель в моделировании производства аграрной продукции

Я.М. Иваньо, А.О. Замараев, Д.Р. Чернигова

*Иркутский государственный аграрный университет,
Россия, Иркутская обл., Иркутский р-он, п. Молодежный*

Аннотация: В статье приведен краткий анализ получения данных с помощью дистанционного зондирования Земли и наземных инструментов для решения задачи оптимизации производства растениеводческой продукции на неоднородных сельскохозяйственных угодьях. Предложены модели оптимизации получения растениеводческой продукции в усредненных условиях и с учетом неблагоприятных экстремальных событий. Разработанные модели параметрического и стохастического программирования соответствуют требованиям современного информационного обеспечения сельскохозяйственных товаропроизводителей.

Ключевые слова: мониторинг, данные, оптимизация, детерминированная модель, многоуровневая параметрическая модель, стохастическая модель, растениеводство.

Введение

Планирование производства аграрной продукции позволяет эффективно использовать ресурсы при наличии адекватных данных производственных процессов, влиянии внешних факторов, реализации товара. Наличие систем точного земледелия, спутниковой информации, географических информационных систем, данных беспилотных летательных аппаратов, автоматизированных агрометеорологических площадок способствует детализации процесса получения необходимых сведений, уменьшая неопределенность производственно-экономических показателей [1-3].

Эффективность получения продовольственной продукции зависит от оптимального использования ресурсов, развития технологий производства переработки и реализации продукции, а также от внедрения цифровых технологий для автоматизации получения, систематизации и обработки данных [4]. Для решения этих задач применяются однокритериальные и многокритериальные математические модели с учетом и без учета динамики в условиях многофакторного воздействия на производство продукции [5-7]. При этом необходимо учитывать природно-климатические и технологические факторы с учетом особенностей регионов нашей страны [8].

Даже при использовании современных технологий производства предприятия теряют значительную часть сельскохозяйственной продукции под влиянием природных событий.

Изменение климатических условий предполагает разработку и применения моделей, адаптированных к изменчивости внешней среды для минимизации рисков [9, 10]. Очевидно, что использование большого количества данных усложняет процесс моделирования, поэтому для разработки и применения математических моделей применяется программное обеспечение и искусственный интеллект [11, 12].

Очень часто для решения задач сельского хозяйства используют модели математического программирования в условиях неопределенности [13, 14]. При автоматизации мониторинга данных эти модели имеют особое научно-практическое значение для управления производственными процессами. Подробная оценка полевых условий на разных этапах ведения сельского хозяйства позволяет эффективно использовать ресурсы и, в конечном итоге, уменьшать вариацию результатов деятельности предприятия.

Цель статьи – описание разработанных моделей планирования характеристик растениеводства на основе параметрических и стохастических экстремальных задач с привлечением данных мониторинга о неоднородности посевных площадей.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- разработка модифицированных детерминированных моделей для планирования продукции растениеводства в условиях неоднородности плодородия посевных площадей;
 - создание моделей планирования растениеводческой продукции с учетом неоднородных участков посевов и экстремальных событий;
 - применение предложенных моделей на примере сельскохозяйственного предприятия Иркутской области.
-

Научная новизна исследования заключается в разработке моделей планирования растениеводческой продукции на неоднородных участках посевов для усредненных и экстремальных условий ведения сельского хозяйства с учетом динамики и неопределенности характеристик моделей.

При мониторинге производства аграрной продукции необходимы многолетние экспериментальные исследования, сопровождающиеся сбором метеоданных, сведений о состоянии почвы, развитии растений с учетом воздействия различных факторов. Мониторинг данных производства аграрной продукции обеспечивает оперативную обработку в реальном времени с использованием приборов, измеряющих метеорологические данные, почвенные характеристики, а также формирующие сведения о поверхности земли, как с помощью беспилотных летательных аппаратов (далее БПЛА), так и пилотируемых систем [3]. На основе полученных данных можно оптимизировать технологические процессы производства сельскохозяйственных культур.

Одной из основных характеристик почвы является ее плодородие, которое может быть определено разными способами. На основе данных о почвенных характеристиках можно определить, какие сельскохозяйственные культуры будут наиболее успешными на данном участке. Информация о почвенных характеристиках позволяет также оптимизировать использование водных, химических и механических элементов почвы для повышения урожайности сельскохозяйственных культур [9].

При картировании урожайности поле рассматривается как совокупность элементарных участков с оценкой биопродуктивности сельскохозяйственной культуры на этих участках.

Цифровая карта урожайности и карта агрохимического обследования используются для создания дифференцированных технологий управления урожаем [12].

Для оценки состояния растительности применяется вегетационный индекс NDVI (далее Normalized Difference Vegetation Index), характеризующий плотность растительности. Полученные значения NDVI используются для создания карт вегетации. Путем сравнения значений NDVI в разные моменты времени или на разных участках, можно анализировать рост растений, выявлять проблемы в сельском хозяйстве (например, стресс растений, недостаток воды) и принимать управленческие решения, такие как оптимизация полива или управление урожайностью [2].

Технология картирования урожайности сельскохозяйственных культур позволяет определять ее неоднородность, позволяя получать координаты со спутников, связывать показания датчиков с электронной картой, создавать цифровую карту урожайности.

Согласно анализу полевых данных разрабатываются модели для прогнозирования и корректировки технологических процессов. Кроме того, можно оптимизировать производство растениеводческой продукции, используя задачи математического программирования с учетом неоднородности сельскохозяйственных земель для правильного распределения и использования ресурсов.

Материалы и методы

При разработке моделей оптимизации производства аграрной продукции использованы детерминированные задачи линейного программирования и экстремальные задачи с неопределенными характеристиками. Применение задач математического программирования в конкретном исследовании основывается на рассмотрении земельных ресурсов в виде неоднородных участков по плодородию почвы.

Для оценки неоднородности сельскохозяйственных угодий использованы исследования и результаты многих авторов, занимавшихся

решением проблем автоматизированного мониторинга данных на разных этапах производства сельскохозяйственной продукции [8, 16].

Основные результаты

Разработана математическая модель линейного программирования, позволяющая учитывать различия в почвенных свойствах – структуре, уровне плодородия, химическом, механическом, физическом составе для точечного внесения удобрений, средств защиты растений и проведения других мероприятий. Эта модель при наличии соответствующих данных способствует повышению точности планирования и управления сельскохозяйственными процессами за счет увеличения урожая на каждом выделенном участке земли.

Рассмотрим модели оптимизации получения продукции растениеводства на основе моделей, предложенных в работе [15]. Особенностями моделей, предлагаемых в статье, является описание отрасли растениеводства, в наибольшей степени подверженной воздействию внешних факторов, и учет свойств иерархии производственно-экономических характеристик временных рядов, которые могут быть случайными и динамико-стохастическими величинами. При решении задачи планирования в условиях проявления событий предложено использовать условие перехода значения характеристики в событие.

Задача линейного программирования

Максимальный доход от производства растениеводческой продукции определяется выражением:

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} c_{ijs} x_{ijs}, \quad (1)$$

где c_{ijs} – доход, получаемый с единицы площади поля i на участке j в виде продукции s , руб./га; x_{ijs} , – неизвестные задачи линейного программирования, площади посевов в га.

Ограничения по земельным ресурсам имеет вид:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijs} \leq A_s, \quad (2)$$

где A_s – имеющиеся в распоряжении предприятия земельные ресурсы для получения продукции s , га.

Ограничение по получению продукции записываются так:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \alpha_{ijs} x_{ijs} \geq D, \quad (3)$$

где α_{ijs} – объемы производства с единицы площади поля i на участке j растениеводческой продукции s , т/га; D – заданный объем получения продукции, т.

Приведем ограничение по использованию трудовых ресурсов:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} d_{ijs} x_{ijs} \geq E, \quad (4)$$

где d_{ijs} – трудозатраты на производство растениеводческой продукции s с единицы площади поля i на участке j , чел. дн/га; E – возможности использования трудозатрат, чел. дн.

Неизвестных модели являются неотрицательными значениями:

$$x_{ijs} \geq 0. \quad (5)$$

Результатом реализации модели (1) – (5) является оптимальное решение: целевая функция f составит максимальное значение дохода с оптимальными планами x_{ijs}^* и y_{ijs}^* .

Получив оптимальный план нетрудно определить объемы произведенной продукции:

$$v_{ijs} = x_{ijs} y_{ijs}, \quad (6)$$

где y_{ijs} – урожайность сельскохозяйственных культур s , полученная на поле i участка j .

Особенностью такой модели в отличие от других моделей [2, 3] является повышение уровня приближения оптимального решения к реальной ситуации.

В результате работы алгоритма получен оптимальный план и значение целевой функции – максимум дохода. Оптимальное решение приведено в таблице № 1. Здесь же размещены данные о средней урожайности зерновых культур, полученной в сельскохозяйственном предприятии АО «Куйтунская Нива».

Согласно алгоритму, выполняются следующие модули: создание базы данных на основе собранных сведений, определение статистических закономерностей характеристик модели, построение линейной модели, ее реализация для оптимизации получения растениеводческой продукции, определение оптимального решения линейной модели. В каждом модуле может выполняться не одна, а несколько операций. Например, сбор данных подразумевает получение сведений дистанционного зондирования, точного земледелия и других материалов [11].

Таблица № 1

Оптимальное решение задачи (1) – (6) для средней урожайности зерновых культур в сельскохозяйственном предприятии АО «Куйтунская Нива»

Характеристики	Пшеница			Ячмень		Овес	Доход тыс. руб.
	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	
Площади га	2500	1500	1000	2000	1000	2000	
Урожайность, т/га	1,91	1,81	2,00	1,80	1,90	1,65	
Объемы, т	4775	2715	2000	3600	1900	3300	

Таким образом, получены оптимальные объемы производства зерновых культур на трех участках пшеницы, двух участках ячменя и одном овса.

Модель параметрического программирования

Модель параметрического программирования для планирования производства сельскохозяйственной продукции представляет собой математическую модель, которая использует параметры или переменные для определения оптимальных стратегий производства на сельскохозяйственных угодьях. Эти параметры могут включать в себя различные факторы, такие как плодородие почвы, климатические условия, доступность ресурсов, цены на сельскохозяйственные продукты и многие другие [10].

Другим важным аспектом данной модели является учет изменяющихся ресурсов. В сельском хозяйстве многие характеристики модели могут меняться во времени: цены на сельскохозяйственную продукцию, трудозатраты, урожайность сельскохозяйственных культур и другие. Модель параметрического программирования позволяет учесть эти изменения и адаптировать стратегии планирования в реальном времени.

В работе предложены многоуровневые тренды, характеризующие тенденции локальных минимумов и максимумов и всего временного ряда. В этом случае модель параметрического программирования выглядит следующим образом [10, 16].

Максимальный доход от производства растениеводческой продукции определяется выражением

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} c_{ijs}^{\mu}(t) x_{ijs}, \quad (7)$$

где $c(t)_{ijs}$ – доход, получаемый с единицы площади поля i на участке j в виде продукции s , зависящий от параметра t ; x_{ijs} – неизвестные задачи линейного программирования, μ – уровень тренда.

Ограничения по земельным ресурсам соответствуют неравенству (2).

Условие по производству продукции можно записать так:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \alpha_{ijs}^{\mu}(t) x_{ijs} \geq D, \quad (8)$$

где $\alpha_{ijs}(t)$ – объемы производства с единицы площади поля i на участке j растениеводческой продукции s ; D – заданный объем получения продукции. В приведенном неравенстве t характеризует время.

Ограничение по использованию трудовых ресурсов запишем в виде

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} d_{ijs}^{\mu}(t) x_{ijs} \geq E, \quad (9)$$

где $d_{ijs}(t)$ – трудозатраты на производство растениеводческой продукции s с единицы площади поля i на участке j ; E – возможности использования трудозатрат.

Значения искоемых переменных не должны быть отрицательными (5).

В отличие от модели (1) – (6) данная модель учитывает временную динамику и изменения во времени. Временные интервалы могут быть заданы в днях, неделях, месяцах или других единицах измерения, в зависимости от временного масштаба анализа. Модель учитывает, какие решения необходимо принимать на каждом временном шаге.

Кроме того, в качестве t можно использовать метеорологические факторы и индекс вегетации.

Отличием алгоритма реализации модели параметрического программирования от линейной модели заключается в том, что некоторая часть характеристик третьего модуля «Обработка данных, определение статистических закономерностей характеристик модели» зависит от некоторого параметра. В качестве такого параметра часто используется время. В частности, динамика урожайности сельскохозяйственных культур или трудозатраты на производство единицы продукции можно описать с помощью значимого тренда. Трендовые модели ограничены некоторым показателем значения упреждения T (краткосрочный, среднесрочный,

долгосрочный прогноз). Таким образом, если выполняется условие перехода $t \leq T$, тогда определенное количество раз решается задача линейного программирования и определяется максимальное значение целевой функции и оптимальных планов в зависимости от значения параметра t .

При описании рядов производственно-экономических характеристик в виде многоуровневых трендов в этом случае будут реализованы три линейные задачи, соответствующие одному значению t , в частности, при среднесрочном прогнозировании на пять шагов, получено 15 вариантов решения задач линейного программирования. Такой алгоритм позволяет решать задачи для некоторых усредненных ситуаций, благоприятных и неблагоприятных условий деятельности сельскохозяйственного товаропроизводителя.

Предложенная задача решена для уровней, характеризующих усредненную и низкую урожайность. В таблице № 2 получено оптимальное решение задачи параметрического программирования при описании характеристик модели многоуровневыми трендами для усредненных тенденций.

Таблица № 2

Результаты решения задачи параметрического программирования для усредненных трендов урожайности зерновых культур по данным

АО «Куйтунская Нива»

Характеристики	Пшеница			Ячмень		Овес	Доход
	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	
Площади га	2500	1500	1000	2000	1000	2000	365379 тыс. руб.
Урожайность, т/га	2,69	2,52	2,76	2,40	2,55	2,29	
Объемы, т	6725	3780	2760	4800	2550	4580	

Разработанная модель и алгоритм ее реализации позволяет планировать производство аграрной продукции в усредненных, благоприятных и

неблагоприятных условиях. При этом в зависимости от устойчивости трендов планирование может осуществляться на краткосрочный и среднесрочный периоды.

Стохастическая модель с учетом потерь

Стохастическая модель оптимизации аграрного производства в условиях проявления экстремальных событий позволяет планировать производственные процессы, учитывая вероятность возникновения неблагоприятных ситуаций в виде наводнения, засухи, заморозков и других непредсказуемых явлений.

Рассмотрим две ситуации. В первой из них урожайность сельскохозяйственных культур и трудозатраты могут быть описаны многоуровневыми трендами, а события представляют собой значения, находящиеся ниже тренда локальных минимумов, характеризуясь вероятностным распределением. Для событий модель оптимизации производства растениеводческой продукции на неоднородных посевных площадях примет следующий вид.

Максимальный доход соответствует выражению (7).

Ограничения по земельным ресурсам соответствуют неравенству (2).

Неравенство по производству продукции можно записать так:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \alpha_{ijs}^{\mu p} x_{ijs} \geq D, \quad (10)$$

где $\alpha_{ijs}^{\mu p}$ – объемы производства с единицы площади поля i на участке j растениеводческой продукции s с вероятностью события p ; D – заданный объем получения продукции.

Ограничение по использованию трудовых ресурсов запишем в виде

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} d_{ijs}^{\mu} x_{ijs} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \delta_{ijs}^{\mu p} x_{ijs} \leq E, \quad (11)$$

где d_{ijs}^{μ} – трудозатраты на производство растениеводческой продукции s с единицы площади поля i на участке j ; $\delta_{ijs}^{\mu p}$ – дополнительные трудозатраты на производство растениеводческой продукции s с единицы площади поля i на участке j , соответствующие вероятности p ; E – возможности использования трудозатрат.

Очевидно, что неизвестные модели должны быть неотрицательными (5).

Приведенная модель (2), (5), (7), (10) и (11) позволяет получать оптимальные планы продукции растениеводства при условии влияния на деятельность товаропроизводителей разных климатических событий, из которых наибольший ущерб наносит засуха.

В дополнение к этому при отсутствии значимых трендов для урожайности сельскохозяйственных культур и трудозатрат на производство единицы продукции неравенства (10) и (11) можно записать так:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \alpha_{ijs}^p x_{ijs} \geq D, \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} d_{ijs} x_{ijs} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \delta_{ijs}^p x_{ijs} \leq E. \quad (13)$$

Результатом моделирования согласно модели (2), (5), (7), (10) и (11) будут оптимальные решения соответствующие средней вероятности событий при условии $p < p_k$, где p_k – вероятность перехода значения характеристики в событие, соответствующее нулевой разности между фактическими значениями ряда и уровнями тренда локальных минимумов.

С помощью модели (2), (5), (7), (12) и (13) осуществляется определение оптимальных решения для событий с вероятностями меньше значения p_k . В отличие от предшествующей модели вероятность перехода значения в событие соответствует вероятности среднего уровня локальных минимумов.

В отличие от решения детерминированной задачи в этой модели коэффициенты неизвестных или правых частей ограничений связаны с

законом распределения вероятности, поэтому каждому решению будет соответствовать некоторая вероятность. Поскольку конкретная характеристика модели может иметь свою вероятность, то значение целевой функции в простейшем случае соответствует некоторой средней вероятности. Кроме того, можно использовать взвешенные значения вероятности.

Задачу можно решать, задавая вероятность по условию $p < p_k$. При многократной реализации предложенных моделей с учетом разных значений вероятностей разных характеристик эффективно использовать метод статистических испытаний. Таким образом, можно получить множество оптимальных решений в виде некоторого вероятностного распределения целевой функции, связанной с оптимальными планами. Опыт моделирования случайных событий показывает адекватность их описания распределением Пирсона III типа. Благодаря условию $p < p_k$ сокращается диапазон моделируемых оптимальных планов. После оценки значений и вероятностей событий формируется модель с целевой функцией и ограничениями. На основе многоуровневых трендов урожайности зерновых культур выделены события с наибольшими потерями с оценками их вероятностей, наблюдавшихся на рассматриваемых полях (наихудший вариант производства зерна за 1996 – 2024 гг.), и получено оптимальное решение (таблица №3).

Отдельно может быть решена задача с редкими событиями – наименьшими вероятностными значениями характеристик экстремальной задачи. Однако следует иметь в виду, что одновременное проявление редких событий разного происхождения обладает очень малой вероятностью, близкой к нулю. Такое заключение следует из опыта моделирования большого числа событий, связанных с экстремальными климатическими явлениями.

Таблица № 3

Результаты решения задачи с вероятностными оценками с учетом
влияния на производство событий, полученные по данным

АО «Куйтунская Нива»

Характеристики	Пшеница			Ячмень		Овес	Средняя вероятность p
	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	
Площади га	2500	1500	1000	2000	1000	2000	0,0445
Урожайность, т/га	1,18	1,23	1,05	1,35	1,40	1,71	
p	0,0242	0,0300	0,0222	0,0822	0,085	0,0231	
Потери	-2,2	-1,8	-2,5	-2,4	-2,1	-3,2	Доход 193196 тыс. руб.
Объемы, т	2950,0	1845	1050	2700	1400	3420	

Оптимальный план с максимальным доходом соответствует усредненной вероятности 0,0445. Для моделирования других ситуаций с использованием метода статистических испытаний определяются разные сочетания вероятностей и соответствующих им урожайности сельскохозяйственных культур. Для каждого сочетания биопродуктивности строится модель, и рассчитывается оптимальное решение, соответствующее расчетной средней вероятности.

Выводы. Предложено три варианта моделей оптимизации производства растениеводческой продукции на неоднородных землях. С помощью линейной детерминированной модели с целевой функцией в виде максимума прибыли можно получать оптимальные решения по распределению площадей под разные культуры с учетом их неоднородности. Модель параметрического программирования позволяет определять оптимальные планы в разных условиях деятельности сельскохозяйственного предприятия благодаря прогностическим возможностям многоуровневых трендов

многoletних рядов некоторых производственно-экономических характеристик. Третий вариант задачи связан с оценкой вероятных ущербов урожаю в результате воздействия природных и антропогенных факторов и использованию этих результатов для оптимизации производства продукции в неблагоприятных условиях.

Предложенные модели реализованы на примере хозяйства, специализирующегося на производстве зерновых культур.

***Благодарность.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 24-21-00502, rscf.ru/project/24-21-00502/.*

Литература

1. Жукова М.А., Улезько А.В. Перспективы цифровой трансформации сельского хозяйства: монография. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – 179 с.
 2. Попов А.А., Мищенко А.И. Использование геоинформационных систем в сельском хозяйстве // Земледелие. – 2019. – №5. – С. 25–28.
 3. Чернигова Д.Р. Применение методов дистанционного зондирования для целей мониторинга сельскохозяйственных земель // Климат, Экология, сельское хозяйство Евразии. Материалы X международной научно-практической конференции / Молодежный: Изд-во ИрГАУ, 2021. - С. 63-64.
 4. Золотарев С.Н. Оценка экономической эффективности производства продукции растениеводства и пути ее повышения в аграрном секторе экономики // Финансовая жизнь. 2020. № 4. С. 51-57.
 5. Панкратова Н.Д. Математическое моделирование в сельском хозяйстве. – М.: Агропромиздат, 2008. – 232 с.
 6. Белякова А.Ю., Бузина Т.С., Иваньо Я.М. Многокритериальная параметрическая оптимизация получения продовольственной продукции // Инженерный вестник Дона, 2024, № 6 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2024/9268.
-

7. Дроздов Н. А., Куликов С. А. Математические модели и информационные технологии в управлении аграрным производством // Вестник РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2017, № 4(76), с. 121–128.

8. Глебов И.П., Жданов В.Ю. Моделирование и анализ аграрного производства в регионах России // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. 2024. № 4 (80). URL: eee-region.ru/article/8016

9. Тарико А.Н., Романовский В.В. Изменения климатических условий и их влияние на агроклиматический потенциал территории Сибири // География и природные ресурсы. – 2019. – № 4. – С. 35–42.

10. Иваньо Я.М., Барсукова М.Н., Петрова С.А., Цыренжапова В.В. Алгоритм моделирования характеристик производства растениеводческой продукции при неблагоприятных условиях // Инженерный вестник Дона, 2024. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2024/9476.

11. Рогачев А.Ф., Мелихова Е.В. Система компьютерного моделирования и интеллектуального управления программируемым аграрным производством на основе ретроспективных данных // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 2 (62). С. 390-403.

12. Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Белобров В.П., Ведешин Л.А., Шаповалов Д.А. Использование нейронных сетей и облачных сервисов для выделения геометрий сельскохозяйственных полей на основе данных дистанционного зондирования Земли // Исследование Земли из космоса. 2023. № 6. С. 98-105.

13. Васильев Ф. П. Методы оптимизации // Книга 1. М.: МЦНМО, 2011. – 620 с.

14. Юдин Д.Б. Математические методы управления в условиях неполной информации: Задачи и методы стохастического программирования // М.: Ленанд, 2017. - 400 с.

15. Иваньо Я.М., Ковадло И.А., Федурин Н.И. О трех моделях линейного программирования применительно к производству аграрной продукции // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3(31). – С. 124-135.

16. Иваньо Я.М., Петрова С.А. Моделирование многоуровневой динамики урожайности сельскохозяйственных культур // Вестник КрасГАУ. 2024. № 12 (213). С. 66-77.

References

1. Zhukova M.A., Ulez'ko A.V. Perspektivy tsifrovoy transformatsii sel'skogo khozyaystva [Prospects for the digital transformation of agriculture]: monografiya. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskiy GAU, 2021. 179 p.
2. Popov A.A., Mishchenko A.I. Zemledelie. 2019. №5. pp. 25-28.
3. Chernigova D.R. Klimat, E`kologiya, sel'skoe xozyaystvo Evrazii. Materialy` X mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Molodezhnyj: Izd-vo IrGAU, 2021. pp. 63-64.
4. Zolotarev S.N. Finansovaya zhizn'. 2020. № 4. pp. 51-57.
5. Pankratova N.D. Matematicheskoe modelirovanie v sel'skom khozyaystve [Mathematical modeling in agriculture]. M.: Agropromizdat, 2008. 232 p.
6. Belyakova A.Yu., Buzina T.S., Ivan'o Ya.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2024/9268.
7. Drozdov N. A., Kulikov S. A. Vestnik RGAU-MSKhA imeni K.A. Timiryazeva, 2017, № 4(76), pp. 121-128.
8. Glebov I.P., Zhdanov V.Yu. Regional'naya ekonomika i upravlenie: elektronnyj nauchnyj zhurnal. 2024. № 4 (80). URL: eee-region.ru/article/8016
9. Tariko A.N., Romanovskiy V.V. Geografiya i prirodnye resursy. 2019. № 4. pp. 35-42.

10. Ivan'o Ya.M., Barsukova M.N., Petrova S.A., Tsyrenzhapova V.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 9 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2024/9476.
11. Rogachev A.F., Melikhova E.V. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2021. № 2 (62). pp. 390-403.
12. Ermolaev N.R., Yudin S.A., Belobrov V.P., Vedeshin L.A., Shapovalov D.A. Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2023. № 6. pp. 98-105.
13. Vasil'ev F. P. Metody optimizatsii [Optimization methods]. Kniga 1. M.: MTsNMO, 2011. 620 p.
14. Yudin D.B. Matematicheskie metody upravleniya v usloviyakh nepolnoy informatsii: Zadachi i metody stokhasticheskogo programmirovaniya [Mathematical methods of control in conditions of incomplete information: Tasks and methods of stochastic programming] M.: Lenand, 2017. 400 p.
15. Ivan'o Ya.M., Kovadlo I.A., Fedurina N.I. Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. 2023. № 3(31). pp. 124-135.
16. Ivan'o Ya.M., Petrova S.A. Vestnik KrasGAU. 2024. № 12 (213). pp. 66-77.

Дата поступления: 9.07.2025

Дата публикации: 25.08.2025