

Научная статья  
УДК 631.145: 635.21.519.87  
doi: 10.28983/asj.y2023i12pp46-52

### Прогнозирование урожайности картофеля на основе нечетко-возможностной модели

**Зинаида Петровна Котова, Татьяна Алексеевна Данилова,  
Василий Александрович Спесивцев, Юрий Алексеевич Тюкалов**

Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Россия, e-mail: zinaida\_kotova@mail.ru

**Аннотация.** Производство картофеля представляет собой сложную динамическую систему, требующую обеспечения стабильности ее функционирования, в изменяющихся неопределенных условиях хозяйствования и научно обоснованного подхода к принятию эффективных управленческих решений. Цель исследований состояла в оценке и прогнозировании продуктивности картофеля в зависимости от уровня минерального питания и продолжительности вегетационного периода с использованием экспертных знаний и нечетко-возможностного подхода в условиях Республики Карелия. Опыты проводились в 2019–2021 гг. на трех различных по скороспелости сортах картофеля: Удача, Ред Скарлет и Аврора на дерново-слабоподзолистой супесчаной хорошо окультуренной почве. Микрополевой опыт включал в себя два варианта внесения минеральных удобрений:  $N_{80}P_{60}K_{120}$  и  $N_{120}P_{90}K_{180}$ , контролем служил вариант без удобрений. Исследования показали, что внесение минеральных удобрений достоверно увеличивает урожайность клубней на 10–58 %. Урожайность картофеля без применения удобрений в среднем в опытах составляла 28,4 т/га. Наибольшая урожайность картофеля получена на раннем сорте Удача (38,4 т/га) на фоне применения минеральных удобрений в дозе  $N_{80}P_{60}K_{120}$ . Для прогнозирования урожайности картофеля синтезирована адекватная нечетко-возможностная модель (НВМ) на основе явных и неявных экспертных знаний. Показано, что наиболее весомыми факторами при оценке урожайности картофеля всех испытуемых сортов являются уровень минерального питания ( $X_2$ ) и плодородие почвы ( $X_3$ ). Синтезированную НВМ можно использовать для планируемой урожайности картофеля при определенных внешних и сходственных технико-технологических условиях.

**Ключевые слова:** картофель; урожайность; удобрения; нечетко-возможностная модель; оценка; прогноз.

**Для цитирования:** Котова З. П., Данилова Т. А., Спесивцев В. А., Тюкалов Ю. А. Прогнозирование урожайности картофеля на основе нечетко-возможностной модели // Аграрный научный журнал. 2023. № 12. С. 46–52. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp46-52>.

#### AGRONOMY

Original article

### Potato yield forecasting based on a fuzzy-possibility model

**Zinaida P. Kotova, Tatyana A. Danilova, Vasily A. Spesivtsev, Yury A. Tyukalov**

Interdisciplinary Research of Food Supply Problems is a separate structural subdivision of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Pushkin, Russia, e-mail: zinaida\_kotova@mail.ru

**Abstract.** Potato production is a complex dynamic system that requires ensuring the stability of its functioning in changing, uncertain economic conditions and a scientifically based approach to making effective management decisions. The purpose of the research was to assess and predict potato productivity depending on the level of mineral nutrition and the length of the growing season using expert knowledge and a fuzzy-possibility approach in the conditions of the Republic of Karelia. The experiments were carried out in 2019–2021 on three potato varieties of different early maturity: Udacha, Red Scarlet and Aurora on soddy-weakly podzolic sandy loamy well-cultivated soil. The microfield experiment included two options for applying mineral fertilizers:  $N_{80}P_{60}K_{120}$  and  $N_{120}P_{90}K_{180}$ , the variant without fertilizers served as a control. Studies have shown that the application of mineral fertilizers significantly increases the yield of tubers by 10–58%. The yield of potatoes without the use of fertilizers averaged 28.4 t/ha in the experiments. The highest potato yield was obtained on the early variety Udacha (38.4 t/ha) against the background of the use of mineral fertilizers at a dose of  $N_{80}P_{60}K_{120}$ . An adequate fuzzy-possibility model (FPM) based on explicit and implicit expert knowledge has been synthesized to predict potato yield. It is shown that the most significant factors in assessing the yield of potatoes of all tested varieties are the level of mineral nutrition ( $X_2$ ) and soil fertility ( $X_3$ ). The synthesized FPM can be used for the planned potato yield under certain external and similar technical and technological conditions.

**Keywords:** potatoes; productivity; fertilizer; fuzzy-possibility mode; estimation; forecast.

**For citation:** Kotova Z. P., Danilova T. A., Spesivtsev V. A., Tyukalov Yu. A. Potato yield forecasting based on a fuzzy-possibility model. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(12):46–52. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp46-52>.



**Введение.** Обновленная Доктрина продовольственной безопасности РФ на период до 2030 г. исходит из положения абсолютной необходимости быстрого наращивания внутреннего производства высококачественных продуктов питания и конкурентоспособности их на мировом рынке продовольствия [3]. Однако в условиях Северо-Запада России на пути ее успешного решения встает серия фундаментальных проблем, связанных с эффективным использованием агроресурсного потенциала. Это обострение погодно-климатических рисков в связи с глобальными климатическими изменениями [1, 8], неудовлетворительное агроэкологическое состояние сельскохозяйственных угодий [4], выраженная пространственная неоднородность агроэкологических и почвенных условий [9], нестабильное производство растениеводческой продукции по количественным и качественным показателям.

В Северо-Западном регионе Российской Федерации среди возделываемых сельскохозяйственных культур картофелю отводится большое значение, поскольку универсальность его использования на пищевые, кормовые и технические цели способствует существенному обеспечению внутреннего потребления региона в данной культуре. Обладая высокой потенциальной продуктивностью, картофель при благоприятных условиях возделывания способен формировать урожайность до 100 т/га [13]. К аналогичным выводам приходят и зарубежные исследователи. Они показывают, что соотношение между фактической и потенциальной урожайностью колеблется от 10 до 75 %, но типичные значения составляют от 30 до 40 %. Однако получить такой урожай в производственных условиях чрезвычайно сложно из-за ряда ограничивающих факторов, таких как климатические, почвенные, экологические, агротехнические, биологические, сортовые качества [14, 15]. Одним из обязательных факторов эффективного и устойчивого функционирования картофельных агроценозов является рациональное использование минеральных удобрений, позволяющее получать не менее 30–50 % дополнительной прибавки урожая с хорошим качеством при сохранении и повышении почвенного плодородия [5, 12, 16].

В то же время следует признать, что технологический процесс производства картофеля представляет собой сложную динамическую систему, включающую множество подсистем, и требует не только обеспечения стабильности ее функционирования в изменяющихся неопределенных условиях хозяйствования, но и научно обоснованного подхода к принятию эффективных управленческих решений [12]. При этом существует необходимость разработки соответствующих моделей и методов поддержки принятия решений при управлении параметрами производственных систем, которые в последнее время приобрели весьма актуальное значение [2, 6, 7].

Целью исследований данной работы было обобщение полученных данных по влиянию минеральных удобрений на урожайность различных сортов картофеля в условиях Республики Карелии и прогнозированию урожайности культуры в зависимости от уровня минерального питания и продолжительности вегетационного периода с использованием экспертных знаний и нечетко-возможностного подхода.

**Методика исследований.** Объектом исследования являлись три сорта картофеля (Удача, Ред Скарлет и Аврора), отличающихся друг от друга по срокам созревания от раннего (Удача) до среднеспелого (Аврора). Опыты проводили в 2019–2021 гг. в Пряжинском районе Республики Карелии. Схема опытов включала в себя три варианта: 1) без удобрений – контроль; 2)  $N_{80}P_{60}K_{120}$  – доза, рассчитанная на КПД ФАР 1,5; 3)  $N_{120}P_{90}K_{180}$  – доза, рассчитанная на КПД ФАР 2,5.

Площадь опытной делянки – 3 м<sup>2</sup> (1,5×2 м), повторность в опыте 4-кратная, размещение вариантов по ярусам систематическое. Посадку проводили во второй – третьей декадах мая в нарезанные борозды по схеме 70×30 см. Густота посадки составляла 47,6 тыс. шт. клубней на 1 га. Применяемая в опытах агротехника – общепринятая для региона (предшественник – однолетние травы; защитные мероприятия – обработки против сорняков, против фитофтороза). Основную уборку проводили на всех сортах одновременно, после уборки ботвы сплошным весовым методом.

Почва участков дерново-слабоподзолистая супесчаная хорошо окультуренная. Содержание органического вещества составляло 3,6 %, рН<sub>кел</sub> 5,7, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (подвижного по Кирсанову) – 450 мг/кг почвы, K<sub>2</sub>O (обменного по Масловой) – 100 мг /кг почвы.

Метеорологические условия за период исследований были различными: 2019 и 2021 гг. – избыточно-увлажненные, гидротермический коэффициент (ГТК) в период активной вегетации составлял 3,38 и 2,14; 2020 г. – слабо засушливый (ГТК = 1,06). Статистическую обработку урожайности проводили с применением программы Excel и Stat graphic.

Разработку методики построения нечетко-возможностной модели (НВМ) по оцениванию и прогнозированию урожайности картофеля осуществляли с использованием профессиональных знаний и опыта экспертов. Под экспертными знаниями понимаются явные и неявные знания эксперта, накопленные в процессе профессиональной деятельности, позволяющие ему выступать в качестве «интеллектуальной измерительно-диагностической системы» для извлечения и последующего использования их при построении НВМ. При этом методика построения НВМ состояла из следующих шагов (этапов):

- формулировка задачи, выбор и обоснование факторного пространства, в котором принимается решение, построение вербально-числовых шкал для всех переменных;
- представление выбранных характеристик в виде лингвистических переменных с соответствующими шкалами измерений. Построение множества нечетких продукционных правил имплицативного типа «если..., то...» как формы представления экспертных знаний;





- подготовка на основе методов теории планирования экспериментов опросной матрицы для выбранного факторного пространства и заполнение ее экспертом. Строки матрицы – нечеткие продукционные правила импликативного типа «ситуация – оценка». Построение полиномиального выражения методами теории планирования экспериментов и экспертных знаний, представленных в опросной таблице;
- оценивание в многомерном пространстве лингвистических переменных степени адекватности вычислений по модели со значимыми коэффициентами: а) мнению эксперта, б) действительному состоянию исследуемого явления, в нашем случае – урожайности картофеля;
- проведение экспертом профессионального анализа построенной модели для извлечения новой информации о специфике изучаемого явления.

Характерной особенностью разрабатываемой методики является то, что «материалом» для создания математической модели служат явные и неявные экспертные знания, а используемым методом – нечетко-возможностный подход (НВП) [16].

**Результаты исследований.** За годы исследований (2019–2021 гг.) внесение минеральных удобрений достоверно увеличивало урожайность клубней картофеля в среднем по сортам на 10–58 %. Средняя урожайность картофеля без применения удобрений составила 28,4 т/га, при внесении  $N_{80}P_{60}K_{120}$  – 36,4 т/га (прибавка 28 %), при внесении  $N_{120}P_{90}K_{180}$  – 36,5 т/га (прибавка 28,3 %). Наибольшая урожайность была получена на раннем сорте Удача (38,4 т/га) при внесении минеральных удобрений в дозе  $N_{80}P_{60}K_{120}$ , что выше на 7,2 т/га, или 23,1% по сравнению с вариантом без внесения удобрений. Среднеспелый сорт Аврора наиболее отзывчив на внесение минеральных удобрений, обеспечив при этом за годы исследований прибавку урожайности картофеля 57,7 и 56,6 % по сравнению с контролем (без удобрений). Таким образом, применение различных доз минеральных удобрений как фактора управления продукционным процессом картофеля вполне ожидаемо оказало существенное влияние на урожайность всех испытываемых сортов (табл. 1).

Таблица 1

Урожайность картофеля в зависимости от уровня минерального питания (2019–2021 гг.)

| Сорт   | Минеральные удобрения  | Урожайность по годам, т/га |       |       | Средняя урожайность, т/га |
|--|------------------------|----------------------------|-------|-------|---------------------------|
|  |                        | 2019                       | 2020  | 2021  |                           |
| Удача  | Без удобрений          | 31,73                      | 25,92 | 39,53 | 31,23                     |
|  | $N_{80}P_{60}K_{120}$  | 41,24                      | 28,88 | 52,46 | 38,44                     |
|  | $N_{120}P_{90}K_{180}$ | 44,42                      | 30,40 | 45,27 | 35,95                     |
| Ред Скарлетт   | без удобрений          | 24,44                      | 29,77 | 29,64 | 30,32                     |
|  | $N_{80}P_{60}K_{120}$  | 34,97                      | 26,74 | 34,35 | 33,34                     |
|  | $N_{120}P_{90}K_{180}$ | 35,78                      | 33,30 | 34,08 | 36,29                     |
| Аврора   | без удобрений          | 31,16                      | 25,18 | 24,44 | 23,71                     |
|  | $N_{80}P_{60}K_{120}$  | 37,21                      | 46,80 | 33,38 | 37,38                     |
|  | $N_{120}P_{90}K_{180}$ | 36,35                      | 45,05 | 33,42 | 37,14                     |
| НСР <sub>05</sub>  | –                      | 2,36                       | 2,1   | 3,37  | –                         |
| –  | НСР <sub>05</sub>      | 2,5                        | 4,69  | 3,87  | –                         |
| Взаимодействие: сорт – удобрение, при $F_{\text{факт}} < F_{05}$ |                        | 2,23                       | 4,69  | 2,24  | –                         |

Примечание: влияние изучаемых факторов существенно при уровне вероятности  $P = 0,95$

Выявлено, что изучаемые в Республике Карелии сорта картофеля имеют потенциальную продуктивность, которая в значительной мере определяется не только уровнем минерального питания, но и другими агроклиматическими факторами. К ним относятся продолжительность вегетационного периода, сумма эффективной температуры, количество и равномерность распределения осадков, плодородие почвы, максимальная и минимальная температура почвы и др. В связи с этим выбранное экспертами факторное пространство включало в себя шесть переменных величин, представленных в лингвистическом виде в табл. 2.

Выбор переменных был обусловлен необходимостью системности представления урожайности картофеля:  $X_1$  характеризует сам объект исследования – через продолжительность его вегетационного периода,  $X_4$  и  $X_6$  – обуславливают жизнедеятельную среду для функционирования всех этапов цикла урожайности, а  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_5$  – внешние факторы, действующие на урожайность. Факторное пространство содержит как количественные (измеряемые), так и неколичественные (вербальные) значения. В качестве зависимой величины выбрана переменная  $Y$  – урожайность, т/га, вербально-числовая шкала которой приведена в табл. 3.

Построение НВМ основывается на извлечении и последующей формализации знаний эксперта. Для этого по методикам теории планирования экспериментов была построена специальная опросная матрица (см. табл. 3) из

лингвистических переменных (см. табл. 1), и эксперт вербально с учетом вербально-числовой шкалы оценивал представленные в табл. 2 ситуации на основе своих профессиональных знаний и опыта. Каждая строка в опросной матрице представляет собой нечеткое продукционное правило импликативного типа «если..., то...». При этом все лингвистические переменные задавались в кодированном (стандартизованном) виде на интервале  $[-1; +1]$ , что давало возможность выражать все коэффициенты модели в безразмерном стандартизованном масштабе.

Таблица 2

**Лингвистические переменные факторного пространства**

| Переменные факторного пространства  | Лингвистическое представление переменной |
|---|--|
| $X_1$ – продолжительность вегетационного периода  |  |
| $X_2$ – уровень минерального питания<br>Н – без удобрений<br>С – $N_{80}P_{60}K_{120}$<br>В – $N_{120}P_{90}K_{180}$  |  |
| $X_3$ – гранулометрический состав почвы<br>Н – песчаные и глинистые почвы<br>НС – тяжелосуглинистые почвы<br>С – супесчаные почвы<br>ВС – супесчаные и легкосуглинистые почвы<br>В – легко- и среднесуглинистые почвы   |  |
| $X_4$ – прогнозируемое количество и равномерность осадков в период вегетации  |  |
| $X_5$ – плодородие почвы<br>Н – почва, малопригодная для возделывания (освоение целины)<br>НС – слабо окультуренная почва<br>С – средне окультуренная почва<br>ВС – хорошо окультуренная почва<br>В – высоко окультуренная почва, наиболее благоприятная для формирования высокой урожайности |  |
| $X_6$ – уровень благоприятности температуры почвы при посадке   |  |
| Y – урожайность, т/га<br>Н – менее 5<br>НС – до 15<br>С – до 25<br>ВС – до 35<br>В – до 45 и выше   |  |

Таблица 3

**Вербально-числовые шкалы переменной урожайности картофеля**

| Интервал   | Моды интервалов |    |     | Числовая характеристика Y, т/га |
|------------|-----------------|----|-----|---------------------------------|
| 0,4 и ниже | низкая          | Н  | 0,3 | 5                               |
| 0,3–0,5    | ниже средней    | НС | 0,4 | 15                              |
| 0,4–0,6    | средняя         | С  | 0,5 | 25                              |
| 0,5–0,7    | выше средней    | ВС | 0,6 | 35                              |
| 0,6 и выше | высокая         | В  | 0,7 | 45                              |





Следующим шагом используемой методики является построение НВМ, которая основывается на извлечении и последующей формализации знаний эксперта. Для этого по методикам теории планирования экспериментов нами была построена специальная опросная матрица (табл. 4) из лингвистических переменных (см. табл. 2), и эксперт вербально с учетом вербально-числовой шкалы оценивал представленные в табл. 3 ситуации на основе своих профессиональных знаний и опыта.

Перечисленные процедуры обеспечивают, во-первых, независимость переменных (по свойству ортогональности опросной матрицы, табл. 4), а во-вторых, – представление профессиональных знаний и опыта эксперта через коэффициенты модели. В этом проявляется коренное отличие НВМ от множественных регрессий, построенных на обработке данных тем же методом наименьших квадратов, которые, как правило, усложняются неизбежной мультиколлинеарностью переменных факторного пространства и всеми ошибками в измерениях исходной информации. В табл. 4 приведен фрагмент опросной матрицы, реализующей полуреплику полного факторного эксперимента.

Таблица 4

Фрагмент опросной матрицы с оценками эксперта и вычисленными по модели (1) значениями урожайности картофеля

| Номер ситуации | Продолжительность вегетационного периода | Уровень минерального питания | Гранулометрический состав почвы | Количество и равномерность осадков в период вегетации | Плодородие почвы | Степень благоприятности температуры почвы при посадке | Урожайность, Y, т/га       |                           |           |
|----------------|--|------------------------------|---------------------------------|---|------------------|---|----------------------------|---------------------------|-----------|
|                |  |                              |                                 |   |                  |   | Вербальная, Y <sub>в</sub> | Численная, Y <sub>ч</sub> | Расчетная |
|                | x <sub>1</sub>                           | x <sub>2</sub>               | x <sub>3</sub>                  | x <sub>4</sub>  | x <sub>5</sub>   | x <sub>6</sub>  |                            |                           |           |
| 1              | -1                                       | -1                           | -1                              | -1  | -1               | -1  | Н                          | 0,3                       | 0,297     |
| 2              | 1  | -1                           | -1                              | -1  | -1               | 1   | Н                          | 0,3                       | 0,297     |
| 3              | -1                                       | 1                            | -1                              | -1  | -1               | 1   | Н-НС                       | 0,35                      | 0,359     |
| ...            | ...                                      | ...                          | ...                             | ...   | ...              | ...   | ...                        | ...                       | ...       |
| 30             | 1  | -1                           | 1                               | 1   | 1                | -1  | ВС-В                       | 0,65                      | 0,628     |
| 31             | -1                                       | 1                            | 1                               | 1   | 1                | -1  | В                          | 0,7                       | 0,691     |
| 32             | 1  | 1                            | 1                               | 1   | 1                | 1   | В                          | 0,7                       | 0,691     |

Представленные в табл. 4 вербальные экспертные оценки урожайности (Y<sub>в</sub>) по шкале (см. табл. 3) переводятся в числовые значения урожайности (Y<sub>ч</sub>), которые и являются исходными данными для применения классического метода теории планирования экспериментов при построения расчетного значения Y по модели. Расчет осуществляется с использованием метода наименьших квадратов, но обладает существенными особенностями: ортогональность опросной матрицы планирования экспериментов первого порядка, позволяющего, с одной стороны, уменьшить количество обращений к эксперту (всего 2<sup>n</sup>, где n – количество переменных полного факторного эксперимента), а с другой – упорядочить внутреннюю структуру нечетких продукционных правил при построении модели с числовыми данными, которая приводит к возможности синтеза математической модели в виде многофакторного регрессионного полинома. Вычлняя из этого полинома слагаемые с незначимо отличающимися от нуля коэффициентами, получаем математическую модель изучаемого явления. Кроме того, представленный НВП позволяет получать взаимодействия между переменными факторного пространства, что переводит модель в область нелинейности как объективного отображения свойств сложных объектов, к которым относятся практически все сельскохозяйственные производства [16].

В результате обработки экспертных оценок в численном виде по специальной программе полученная НВМ выглядит следующим образом:

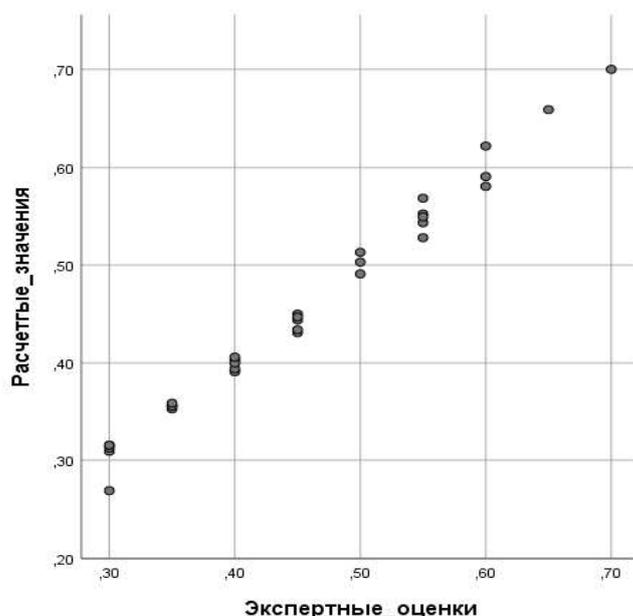
$$Y = 0,506 + 0,009x_1 + 0,069x_2 + 0,034x_3 + 0,047x_4 + 0,066x_5 + 0,019x_6 - 0,013x_4x_5 - 0,013x_1x_2x_3 - 0,025x_1x_2x_4 + 0,009x_1x_3x_5 - 0,019x_2x_3x_5.$$

Согласно разработанной методики в модели (1) представлены только члены разложения со значимыми коэффициентами, а сами переменные – в стандартизованном масштабе.

Таким образом, судя по величине коэффициентов при линейных членах модели (1), наиболее весомыми факторами при оценке урожайности картофеля всех испытуемых сортов Y являются X<sub>2</sub> – уровень минерального питания и X<sub>5</sub> – плодородие почвы, далее следуют X<sub>4</sub> – уровень благоприятности осадков в период вегетации и X<sub>3</sub> – гранулометрический состав почвы.

Степень адекватности расчетов по модели урожайности и мнению экспертов показана на примере сорта Удача (см. рисунок) с оценкой коэффициента корреляции R = 0,98. Кроме того, проведена оценка сте-

пени адекватности расчетов по модели фактической урожайности на примере сорта картофеля Удача по годам, которые существенно отличались между собой. В табл. 5 приведены результаты сравнения по годам в зависимости от уровня минерального питания. На основании проведенного анализа можно утверждать, что модель урожайности адекватно представляет результаты проведенных экспериментов.



*Корреляция экспертных оценок и расчетных значений урожайности картофеля,  $R = 0,98$*

Таблица 5

**Результаты сравнения фактических  $Y_{\Phi}$  и расчетных  $Y_p$  значений урожайности картофеля сорта Удача в зависимости от уровня минерального питания, т/га**

| Вариант опыта          | 2019 г.    |       |              | 2020 г.    |       |              | Среднее за 2019–2020 гг. |       |              |
|------------------------|------------|-------|--------------|------------|-------|--------------|--------------------------|-------|--------------|
|                        | $Y_{\Phi}$ | $Y_p$ | $\Delta, \%$ | $Y_{\Phi}$ | $Y_p$ | $\Delta, \%$ | $Y_{\Phi}$               | $Y_p$ | $\Delta, \%$ |
| Без удобрений          | 31,73      | 34,67 | 9,3          | 25,92      | 25,81 | 0,42         | 31,23                    | 32,20 | 3,11         |
| $N_{80}P_{60}K_{120}$  | 41,24      | 41,05 | -0,46        | 28,88      | 26,68 | -7,61        | 38,44                    | 38,91 | 1,22         |
| $N_{120}P_{90}K_{180}$ | 44,42      | 45,00 | 1,31         | 30,40      | 29,70 | -2,30        | 35,95                    | 36,34 | 1,08         |

В исследованиях показано, что районированные сорта картофеля в Республике Карелии имеют потенциальную продуктивность, которая в значительной мере определяется таким агроклиматическими факторами, как плодородие и гранулометрический состав почвы, уровень минерального питания, количество и равномерность распределения осадков в период вегетации, максимальная и минимальная температура почвы при посадке клубней. При этом следует отметить, что влияния переменных факторного пространства для специалистов известны по их профессиональному опыту, а построенная модель (1) дает количественные оценки этим знаниям и позволяет определять, на сколько или во сколько раз один фактор сильнее других влияет на урожайность картофеля в данных конкретных условиях.

Выявлено, что применение минеральных удобрений как фактора управления производственным процессом картофеля достоверно увеличивало урожайность клубней картофеля в среднем по сортам на 10–58 %. За годы исследований (2019–2021 гг.) средняя урожайность сортов картофеля без применения удобрений в опытах составила 28,4 т/га, при внесении  $N_{80}P_{60}K_{120}$  – 36,4 т/га, при внесении  $N_{120}P_{90}K_{180}$  – 36,5 т/га. Наибольшая урожайность получена на раннем сорте Удача (38,4 т/га) при внесении минеральных удобрений в дозе  $N_{80}P_{60}K_{120}$ , что выше на 7,2 т/га, или 23,1 % по сравнению с вариантом без удобрений. Среднеспелый сорт Аврора наиболее отзывчив на внесение минеральных удобрений, обеспечив при этом за годы исследований прибавку урожайности картофеля 57,7 и 56,6 % по сравнению с контролем без удобрений.

**Заключение.** В результате проведенных исследований была проведена оценка влияния минеральных удобрений на урожайность различных по скороспелости сортов картофеля и дан прогноз урожайности культуры в зависимости от уровня минерального питания с использованием экспертных знаний и нечетко-возможностного подхода. При этом выявлено, что изучаемые в Республике Карелии сорта картофеля имеют потенциальную продуктивность, которая в значительной мере определяется не только уровнем минерального питания, но и другими агроклиматическими факторами.

На основе экспертных знаний и опыта разработана нечетко-возможностная модель прогнозирования урожайности в выбранном многомерном пространстве нечетких лингвистических перемен, позволяющая по величине





коэффициентов при линейных членах созданной модели показать, что наиболее весомыми факторами при оценке урожайности картофеля всех испытуемых сортов являются уровень минерального питания ( $X_2$ ) и плодородие почвы ( $X$ ), далее следуют уровень благоприятности осадков в период вегетации ( $X_4$ ) и гранулометрический состав почвы ( $X_3$ ). Адекватность расчетных значений по модели по мнению эксперта и фактическим данным натурных опытов позволяет применять ее вместо непосредственного обращения к профессионалу-эксперту.

Синтезированную нечетко-возможностную модель можно использовать для прогнозирования урожайности картофеля при условии предполагаемых внешних и сходственных технико-технологических условиях. Применение данного подхода при оценке ресурсов позволяет определить степень их эффективного использования и выявить факторы, которые препятствуют этому. Планирование технологических работ по выращиванию картофеля на основании такого подхода позволит повысить рентабельность сельскохозяйственных предприятий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агротехнические аспекты реализации биоклиматического потенциала Северо-Запада России / А. И. Иванов [и др.] // *Агрофизика*. 2016. № 2. С. 35–44.
2. Асадов Х. Г., Махмудова В. Х. Построение математической модели внесения удобрения в сельскохозяйственные поля в точном земледелии // *Аграрный научный журнал*. 2021. № 11. С. 8–11.
3. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации до 2030 года. М., 2020. 19 с. <http://government.ru/docs/all/125815>.
4. Дубенок Н. Н. Состояние и перспективы развития мелиорации земель в Российской Федерации // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2017. № 2. С. 27–31.
5. Котова З. П., Парфенова Н. В., Камова А. И. Удобрение картофеля на Севере // *Картофель и овощи*. 2015. № 11. С. 31–32.
6. Лойко В. И., Ткаченко В. В., Лытнев Н. Н. Модели и методика оценки технологий сельскохозяйственного производства (на примере растениеводства): программная реализация и основные результаты // *Кубанский ГАУ*. 2017. № 34(10). С. 1–29.
7. Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний / М. Б. Игнатиев [и др.]. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. 501 с.
8. Научные основы эффективного использования агроресурсного потенциала Северо-Запада России / М. В. Архипов [и др.]. СПб. – Пушкин, 2018. 135 с.
9. Оценка параметров пространственной неоднородности показателей почвенного плодородия / А. И. Иванов [и др.] // *Агрохимия*. 2014. № 2. С. 39–49.
10. Попов В. Д., Сухопаров А. И. Информационная и структурная модели управления технологиями в растениеводстве // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2010. № 3. С. 7–8.
11. Спесивцев А. В., Спесивцев В. А. Создание логико-лингвистических моделей на базе неявных экспертных знаний // *Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014610613 от 15 января 2014*.
12. Убугунов Л. Л., Меркушева М. Г. Удобрение картофеля. Новосибирск: Сиб. отд. РАН. СО РАН: Наука, 2019. 264 с.
13. Nitsch A. Die Kartoffeln richtig führen // *Fortschr. Landwirt*. 2008. No. 9. P. 30–33.
14. Haverkort A. J., Struik Paul. Yield levels of potato crops: Recent achievements and future prospects. *FieldCropsResearch*. 2015. 182 p.
15. Yield responses of four common potato cultivars to an industry standard and alternative rotation in Atlantic Canada. 2022. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12230-022-09873-4>.
16. Idrees M. Potassium Humate and NPK Application Rates Influence Yield and Economic Performance of Potato Crops Grown in Clayey Loam Soils // *Soil and Environment*. 2018. Vol. 37. Is. 1. P. 53–61. DOI:10.25252/SE/18/51384.

#### REFERENCES

1. Agrotechnical aspects of bioclimatic potential implementation for North-Western region of Russia / A. I. Ivanov et al. *Agrophysica*. 2016;(2):32–44. (In Russ.).
2. Asadov H. G., Mahmudova V. Kh. Construction of a mathematical model of fertilizer application in agricultural fields in precision agriculture. *Agrarian Scientific Journal*. 2021;(11):8–11. (In Russ.).
3. Doctrine of food security of the Russian Federation up to 2030. M., 2020. 19 p. <http://government.ru/docs/all/125815>. (In Russ.).
4. Dubenok N. N. The state and prospects of development of land reclamation in the Russian Federation. *Melioration and Water Management*. 2017;(2):27–31. (In Russ.).
5. Kotova Z. P., Parfenova N. V., Kamova A. I. Fertilizer of potatoes in the North. *Potatoes and vegetables*. 2015;(11):31–32. (In Russ.).
6. Loiko V. I., Tkachenko V. V., Lytnev N. N. Models and methods for assessing agricultural production technologies (using the example of crop production): software implementation and main results. *Kuban State University*. 2017;34(10):1–29. (In Russ.).
7. Modeling of weakly formalized systems based on explicit and implicit expert knowledge / M. B. Ignatiev et al. SPb.: POLYTECH-PRESS; 2018. 501 p. (In Russ.).
8. Scientific basis for the effective use of agro-resource potential of the North-West of Russia / M. V. Arkhipov et al. St. Petersburg – Pushkin; 2018. 135 p. (In Russ.).
9. Assessment of parameters of spatial heterogeneity of soil fertility indicators / A. I. Ivanov et al. *Agrochemistry*. 2014;(2):39–49. (In Russ.).
10. Popov V. D., Sukhoparov A. I. Information and structural models of technology management in crop production. *Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2010;(3):7–8. (In Russ.).
11. Spesivtsev A. V., Spesivtsev V. A. Creation of logical-linguistic models based on implicit expert knowledge. Certificate of state registration of computer programs No. 2014610613 dated January 15. 2014. (In Russ.).
12. Ubugunov L. L., Merkusheva M. G. Potato fertilizer. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 2019. 264 p. (In Russ.).
13. Nitsch A. Die Kartoffeln richtig führen. *Fortschr. Landwirt*. 2008;(9):30–33.
14. Haverkort A. J., Struik Paul. Yield levels of potato crops: Recent achievements and future prospects. *FieldCropsResearch*; 2015. 182 p.
15. Yield responses of four common potato cultivars to an industry standard and alternative rotation in Atlantic Canada. 2022. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12230-022-09873-4>.
16. Idrees M. Potassium Humate and NPK Application Rates Influence Yield and Economic Performance of Potato Crops Grown in Clayey Loam Soils. *Soil and Environment*. 2018;37(1):53–61. DOI:10.25252/SE/18/51384.

Статья поступила в редакцию 17.03.2023; одобрена после рецензирования 21.04.2023; принята к публикации 28.04.2023.  
The article was 17.03.2023; approved after 21.04.2023; accepted for publication 28.04.2023.