

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

МЕХАНИЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА
MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 634.739.2:581.045:631.559
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-2-154-164>

Поступила в редакцию 12.02.2025
Received 12.02.2025

В. В. Азаренко¹, В. Л. Мисун², А. Л. Мисун²

¹Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ
И АГРОХИМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
И БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННОГО ВЫРАЩИВАНИЯ
КРУПНОПЛОДНОЙ КЛЮКВЫ В УСЛОВИЯХ КОНТРОЛИРУЕМОЙ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ**

Аннотация. Выполнен анализ влияния наиболее существенных природно-климатических и иных факторов (уровень почвенной влаги в периоды активного роста зеленой массы, появления завязей растений, созревания ягод; воздействие возвратных весенних заморозков; качество внесения минеральных удобрений; химическая защита растений на чеках от сорняков, вредителей, болезней) на эффективность и безопасность промышленного выращивания крупноплодной клюквы в условиях изменяющихся параметров производственной среды. На основе логико-лингвистического подхода разработана математическая модель влияния рассматриваемых факторов на потенциальную биологическую урожайность ягод в условиях изменяющегося состояния производственной среды. Определено, что важнейшее значение для эффективного функционирования промышленных клюквенных чеков имеет фактор «химическая защита растений». Установлено, что в условиях выполнения требуемых показателей водно-воздушного и теплового режимов почвы на чеках при несоблюдении агросроков, нарушении дозы и показателей равномерности внесения химических средств защиты растений и минеральных удобрений потери ягод могут составлять свыше 30 % от урожайности.

Ключевые слова: контролируемая производственная среда, клюквенный чек, моделирование, природно-климатические факторы

Для цитирования: Азаренко, В. В. Моделирование влияния природно-климатических и агрохимических факторов на эффективность и безопасность промышленного выращивания крупноплодной клюквы в условиях контролируемой производственной среды / В. В. Азаренко, В. Л. Мисун, А. Л. Мисун // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2025. – Т. 63, № 2. – С. 154–164. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-2-154-164>

Vladimir V. Azarenko¹, Vladimir L. Misun², Aleksey L. Misun²

¹Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

**SIMULATION OF INFLUENCE OF NATURAL AND CLIMATIC AND AGROCHEMICAL FACTORS
ON EFFICIENCY AND SAFETY OF INDUSTRIAL CULTIVATION
OF LARGE-FRUIT CRANBERRY IN CONTROLLED PRODUCTION ENVIRONMENT**

Abstract. The analysis of influence of the most significant natural-and-climatic and other factors (the level of soil moisture during periods of active growth of green mass, emergence of sets, berry ripening; the impact of return spring frosts; the quality of mineral fertilizers application; chemical protection of plants on checks from weeds, pests and diseases) on the efficiency and safety of industrial cultivation of large-fruited cranberries in the conditions of changing parameters of the production environment has been carried out. On the basis of logical-and-linguistic approach, a mathematical model of influence of the considered factors on potential biological yield of berries in conditions of changing

state of industrial environment has been developed. It has been determined that the most important for the effective functioning of industrial cranberry checks is the factor of “chemical protection of plants”. It has been established that under conditions of meeting the required indicators of water-and-air and thermal modes of soil on the checks in case of non-observance of agro-timing, violation of dosage and uniformity indicators of chemical plant protection products and mineral fertilizers application, the losses of berries can make over 30 % of the yield.

Keywords: controlled production environment, cranberry check, simulation, natural and climatic factors

For citation: Azarenko V. V., Misun V. L., Misun A. L. Simulation of influence of natural and climatic and agro-chemical factors on efficiency and safety of industrial cultivation of large-fruit cranberry in controlled production environment. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2025, vol. 63, no. 2, pp. 154–164 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-2-154-164>

Введение. В результате проведенных исследований [1–5] установлено, что нарушение водно-воздушного режима почвы на клюквенном чеке и резкие отклонения режимов от оптимума в сторону уменьшения или увеличения приводят к существенному снижению продуктивности, включая все составляющие элементы – корни, листья, стебли, плоды. Регулирование водно-воздушного режима почвы на промышленных плантациях крупноплодной клюквы осуществляется путем изменения уровня состояния грунтовых вод во внутричековом обводном канале и применения дожделаний [6]. Наиболее эффективно поддержание влажности активного, корнеобитаемого слоя почвы в пределах 60–70 % от полной водоемкости [7]. Такие условия создаются при средних уровнях грунтовых вод (40–50 см) от поверхностной отметки [7].

Важнейшим фактором успешного выращивания крупноплодной клюквы является и создание надежных мер защиты растений от повреждения низкими температурами. Для предотвращения вымерзания и повреждения крупноплодной клюквы на промышленных плантациях в бесснежные или малоснежные зимы используют затопление плантации (чеков) и послойное вмораживание растений в лед¹. Вмораживание рекомендуется начинать при снижении среднесуточной температуры ниже –4 °С и промерзании почвы на глубину 3–4 см. На чек подается вода до получения 1,5–2,0 см слоя и оставляется до замерзания. Затем подача воды возобновляется, и так до тех пор, пока верхушки растений не покроются слоем льда в 2–3 см [7]. Эффективным способом защиты растений при снижении температуры воздуха ночью до 2 °С является дожделение с интенсивностью 0,04–0,06 мм/мин [7]. Температура воздуха, при которой включается дожделвальная система² при угрозе заморозка, зависит от ряда факторов: влажности воздуха, облачности, скорости ветра и др. Регулирование теплового режима на клюквенных чеках проводится и в летнее время, когда температура воздуха поднимается выше 25 °С. Оно осуществляется через дожделвальную систему с интенсивностью 5–10 мм/мин [7].

Рядом исследований доказано [1, 8], что оптимизацией питания за счет состава, количества и соотношения питательных веществ урожай ягод можно увеличить в несколько раз. Регуляция роста и развития растений осуществляется в основном за счет применения азотных, фосфорных и калийных удобрений. Также вносятся в небольших количествах микроэлементы, чтобы удовлетворять потребности растений и способствовать эффективному усвоению минерального питания. Что касается обработки посадок растений крупноплодной клюквы на промышленном чеке гербицидами, то она приурочивается ко времени, когда сорняки на чеке достигают высоты 10–15 см [7] и имеют хорошо развитую листовую поверхность, что обеспечивает их контакт с раствором гербицида. Препараты применяют методом смазывания сорняков, располагающихся над ярусом крупноплодной клюквы [9–11]. Необходимо при этом исключить всякую возможность попадания раствора гербицида на

¹ Проектирование производственных плантаций клюквы крупноплодной: пособие к СНиП 2.06.03–85 «Мелиоративные системы и сооружения. Минск: Белорус. науч.-исслед. ин-т мелиор. и луговодства, 1991. 37 с.

² Там же.

растения крупноплодной клюквы, чтобы не вызвать их повреждения и гибели. Обработка растений фунгицидами проводится в ранневесенний и поздневесенний периоды. Во время же вегетации – в исключительных случаях (при эпифитотиях) [7]. При вспышке массового размножения вредителей и реальной угрозе нанесения ими существенного ущерба плодоносящей плантации применяются и инсектициды.

Методы исследований. Теоретические и экспериментальные исследования выполнены с применением методов экспертной оценки, математической статистики и планирования эксперимента. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием стандартных пакетов прикладных программ (Statistica 6, Matlab 6 и др.).

Результаты и их обсуждение. Для моделирования процесса в качестве выходного параметра принималась максимальная биологическая урожайность крупноплодной клюквы с учетом почвенно-климатических и агрохимических факторов выращивания на промышленном клюквенном чеке в условиях изменяющейся производственной среды (рис. 1).

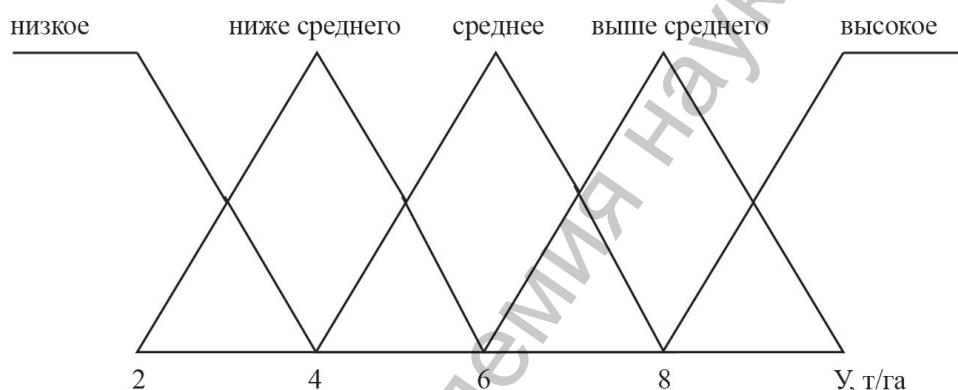


Рис. 1. Урожайность крупноплодной клюквы с одного гектара (чека) убираемой площади (Y) как лингвистическая переменная

Fig. 1. Yield of large-fruited cranberries per hectare (check) of harvested area (Y) as a linguistic variable

По результатам опроса экспертов из большого числа потенциально возможных было выбрано четыре фактора, в большей степени влияющих на урожайность крупноплодной клюквы на чеке. Факторы, согласно алгоритму построения логико-лингвистических моделей, могут быть представлены в виде лингвистических переменных [12]. Каждую из переменных сопровождают таблицы лингвистического (вербального, неколичественного) описания признаков для последующего их перевода в количественный вид [12]. Поскольку описываемые явления носят нечеткий (размытый, неопределенный) характер, то количественная оценка задается не одним числом, а интервалом. В результате исследований выделены следующие факторы, определяющие эффективность и безопасность промышленного выращивания крупноплодной клюквы [1, 8, 13]:

X_1 – уровень почвенной влаги на чеке, качественный показатель. Определяется влажностью почвы в слое 0–50 см в определенные фазы развития растений: в периоды активного роста зеленой массы и появления завязей (конец июня – начало июля), созревания ягод (конец сентября);

X_2 – степень негативного воздействия возвратных весенних заморозков, качественный показатель. Определяется следующими критериями: температурой и влажностью воздуха в предутренние часы, наступлением заморозков в период цветения и (или) образования завязей, скоростью ветра;

X_3 – эффективность внесения минеральных удобрений, качественный показатель. Определяется следующими критериями: типом минеральных удобрений (вид удобрения,

микроэлементов), нормой их внесения; соблюдением агросроков внесения (дата начала и длительность работ); качеством внесения (отклонение нормы внесения от заданной, неравномерность распределения минеральных удобрений по площади);

X_4 – эффективность и безопасность защитных мероприятий для растений от сорняков, вредителей и болезней (химическая защита растений), качественный показатель. Определяется следующими критериями¹ [10]: правильный выбор препарата, дозы внесения; соблюдение агросроков (достаточное количество, своевременность защитного мероприятия); качество проведения защитных мероприятий (отклонение дозы внесения от заданной, неравномерность распределения препарата по площади).

Все лингвистические переменные факторного пространства при определении влияния на урожайность крупноплодной клюквы качественные, их вид приведен на рис. 2.

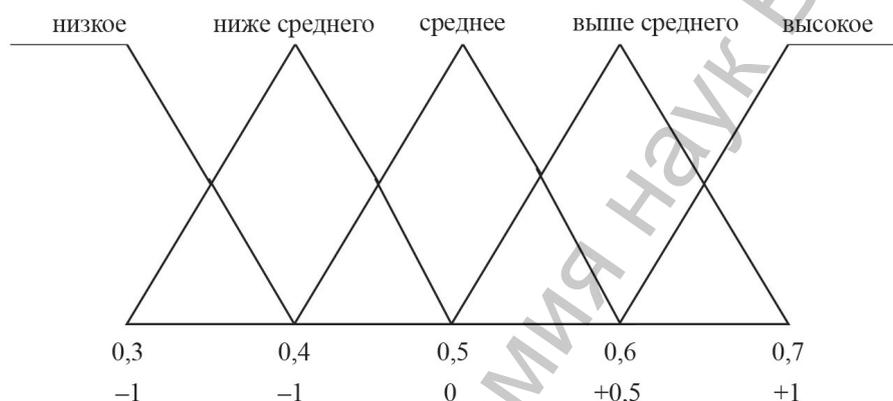


Рис. 2. Факторное пространство в кодированном виде при определении влияния на урожайность крупноплодной клюквы

Fig. 2. Factor space in encoded form when determining the effect on the yield of large-fruited cranberries

Для проведения исследований составлено табличное описание в кодированном и лингвистическом виде для всех факторов, определяющих эффективность и безопасность рассматриваемого процесса [14]. В качестве примера в табл. 1 приведено кодированное и лингвистическое описание фактора X_1 .

Таблица 1. Кодированное и лингвистическое описание фактора X_1 – уровень почвенной влаги на промышленном клюквенном чеке

Table 1. Coded and linguistic description of factor X_1 – soil moisture level on an industrial cranberry field

Границы урожайности участка	Вербальная оценка урожайности ягод	Мода интервала	Косвенные признаки изменения состояния почвенной влаги на промышленном клюквенном чеке [7]
Высокая урожайность (9 т/га и выше)	В	0,7	Влажность активного, корнеобитаемого слоя почвы поддерживается в пределах 60–70 % от полной влагоемкости. Средний уровень грунтовых вод (40–50 см) от поверхностной отметки обеспечивается. Проводятся через дождевальную установку двукратные охладительные поливы при влажности воздуха ниже 50 %. Соблюдается норма расхода воды (100–150 м ³ /га) при каждом поливе

¹ Методические рекомендации по применению средств химизации в системе точного земледелия / Всерос. науч.-исслед. ин-т механизации сел. хоз-ва (ФГБНУ ВИМ); разработ.: А. Ю. Измайлов [и др.]; под общ. ред. А. А. Артюшина. М.: ВИМ, 2016. 99 с.

Границы урожайности участка	Вербальная оценка урожайности ягод	Мода интервала	Косвенные признаки изменения состояния почвенной влаги на промышленном клюквенном чеке [7]
Урожайность выше средней (7...9 т/га)	ВС	0,6	Поддерживается на требуемом уровне влажность активного корнеобитаемого слоя почвы и уровень грунтовых вод. Проводятся двукратные охладительные поливы при влажности воздуха ниже 50 %, но не соблюдается норма расхода воды при каждом поливе. Возможно снижение урожайности до 5 %
Средняя урожайность (5...7 т/га)	С	0,5	Поддерживается на требуемом уровне влажность активного корнеобитаемого слоя почвы и уровень грунтовых вод, но охладительные поливы проводятся не по регламенту, не соблюдается норма расхода воды при поливах. Снижение урожайности на 5–10 %
Урожайность ниже средней (3...5 т/га)	НС	0,4	Уровень влажности активного корнеобитаемого слоя почвы и уровень грунтовых вод на промышленном клюквенном чеке не всегда контролируются. Охладительные поливы выполняются с нарушением регламента. Снижение урожайности на 10–15 %
Низкая урожайность (3 т/га и ниже)	Н	0,3	Уровень влажности активного корнеобитаемого слоя почвы, уровень грунтовых вод на чеке, а также охладительные поливы не контролировались или выполнялись работы по их контролю без соблюдения требований и с нарушением регламента. Снижение урожайности на 15–25 %

Для оценки значимости влияния каждого из рассматриваемых факторов на реализацию потенциальной биологической урожайности крупноплодной клюквы проведен опрос экспертов. Необходимое количество экспертов (m) определялось по следующей формуле [15]:

$$m = \frac{\chi_{\beta; (n-1)}^2}{(\delta + 1)(n - 1) \cdot W_0}, \quad (1)$$

где $\chi_{\beta; (n-1)}^2$ – квантиль распределения, соответствующий доверительной вероятности β и числу степеней свободы $(n - 1)$; n – число оцениваемых факторов ($n = 4$); δ – заданная точность результатов исследований ($\delta = 0,950$); W_0 – критическое значение коэффициента конкордации ($W_0 = 0,100$).

Подставив значения показателей $\chi_{\beta; (n-1)}^2$ [12], δ , n и W_0 в формулу (1), получим m , равное четырем экспертам.

Для проведения исследований был выбран план факторного эксперимента типа $N = 2^n$, где N – число опытов. Каждая строка опросной матрицы (табл. 2) представляет собой продукционное правило имплицативного типа «если... , то...». Так, если уровень почвенной влаги на клюквенном чеке высокий ($X_1 = +1$), воздействие возвратных весенних заморозков отсутствует, то есть уровень защиты растений от заморозков на чеке высокий ($X_2 = +1$), эффективность внесения минеральных удобрений высокая ($X_3 = +1$), химическая защита растений проводится на «высоком» уровне ($X_4 = +1$), то среднее значение обобщенного показателя урожайности ягод с одного гектара промышленной плантации (Y) высокое (В) и составляет 11,50 т/га.

Таблица 2. Опросная матрица с оценками экспертов
Table 2. Survey matrix with expert ratings

№ опыта	Факторы				Химическая защита растений	Вербальная оценка эксперта	Урожайность (Y), т/га						Результаты эксперимента		
	Уровень почвенной влаги	Воздействие возвратных весенних заморозков	Эффективность внесения минеральных удобрений	X ₁			X ₂	X ₃	X ₄	Y ₀	Y ₁	Y _{2j}	Y _{3j}	Y _{4j}	\bar{y}_j
1	+1	+1	+1	+1	+1	B	11,25	11,50	11,50	11,50	11,75	11,50	11,50	0,0083	10,76
2	+1	+1	+1	+1	+1	BC	7,75	7,50	7,50	7,50	8,00	7,68	7,68	0,0115	6,87
3	+1	+1	-1	-1	-1	C	6,25	6,00	6,00	6,25	6,00	6,12	6,12	0,0042	5,97
4	+1	-1	-1	-1	-1	H-BC	3,00	3,00	3,25	3,25	3,00	3,12	3,12	0,0042	2,49
5	-1	-1	-1	-1	-1	H	0,75	1,00	1,00	1,00	0,75	0,87	0,87	0,0042	1,09
6	+1	-1	+1	+1	+1	BC	8,50	8,75	8,75	8,75	8,50	8,62	8,62	0,0042	9,17
7	+1	-1	-1	-1	+1	C-BC	6,50	6,75	6,75	6,75	7,00	6,75	6,75	0,0083	6,05
8	+1	-1	+1	+1	-1	C	5,75	5,75	5,75	6,25	6,00	5,94	5,94	0,0115	6,59
9	+1	+1	-1	-1	+1	BC-B	9,00	9,50	9,50	9,50	9,25	9,31	9,31	0,0115	10,01
10	-1	+1	+1	+1	+1	BC-B	9,50	9,75	9,75	9,75	9,50	9,56	9,56	0,0031	10,48
11	-1	-1	+1	+1	+1	C-BC	7,00	7,25	7,25	7,25	7,25	7,12	7,12	0,0042	6,28
12	-1	-1	-1	-1	+1	HC	5,50	5,75	5,75	5,75	5,50	5,50	5,50	0,0083	6,09
13	-1	+1	-1	-1	-1	HC	4,50	4,25	4,25	4,25	4,75	4,43	4,43	0,0022	3,69
14	-1	+1	-1	-1	+1	C-BC	7,50	7,25	7,25	7,25	7,50	7,37	7,37	0,0042	7,16
15	-1	+1	+1	+1	-1	C	6,75	6,50	6,50	6,50	7,00	6,81	6,81	0,0115	7,51
16	-1	-1	+1	+1	-1	H-BC	3,25	3,50	3,50	3,25	3,25	3,31	3,31	0,0031	2,54
												$\sum_{j=1}^N \bar{y}_j = 104,01$	$\sum_{j=1}^N s_j^2 = 0,1045$	$\sum_{j=1}^N y_j^p = 102,75$	

Для математического описания рассматриваемого процесса целесообразно использовать выражение следующего вида:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i X_i + \sum_{\substack{i=1 \\ i < r}}^N a_{ir} X_i X_r + \sum_{\substack{i=1 \\ i < r \\ r < s}}^N a_{irs} X_i X_r X_s, \quad (2)$$

где $a_0 \dots a_{irs}$ – коэффициенты выражения.

Статистическая обработка результатов экспертного оценивания позволила установить следующее:

а) дисперсии всех опытов в данном эксперименте с доверительной вероятностью 95 % однородны, так как экспериментальное значение критерия Кохрена меньше критического значения $G_3 < G_{n-1;0,95}$ [16]:

$$G_3 = \frac{S_{j\max}^2}{\sum S_j^2} = \frac{0,0115}{0,1045} = 0,1100, \quad G_{3;16;0,95} = 0,2647;$$

б) так как дисперсии всех опытов однородны, то дисперсия воспроизводимости рассчитывается по формуле [17]

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N} = \frac{0,1045}{16} = 0,0065;$$

в) коэффициенты выражения (2)

$$a_0 = \frac{\sum_{j=1}^N \bar{y}_j}{N}, \quad (3)$$

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ij} \cdot \bar{y}_j}{N}, \quad i = 1; 2; 3, \dots, N; \quad (4)$$

$$a_{ir} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ij} \cdot X_{rj} \cdot \bar{y}_j}{N}, \quad i, r = 1; 2; 3, \dots, N; \quad (5)$$

$$a_{irs} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ij} \cdot X_{rj} \cdot X_{sj} \cdot \bar{y}_j}{N}, \quad i, r, s = 1; 2; 3, \dots, N \quad (6)$$

соответственно равны: $a_0 = 6,501$; $a_1 = 0,879$; $a_2 = 1,347$; $a_3 = 1,067$; $a_4 = 1,716$; $a_{12} = -0,074$; $a_{13} = -0,012$; $a_{14} = -0,051$; $a_{23} = -0,027$; $a_{24} = -0,128$; $a_{34} = -0,083$; $a_{123} = -0,981$; $a_{124} = 0,216$; $a_{234} = 0,138$.

Обработка результатов экспертного оценивания по методике А. В. Спесивцева [18, 19], согласно которой в подобных исследованиях учитываются только значимо отличающиеся от нуля коэффициенты, а все независимые переменные представлены в стандартизованном масштабе, позволила получить следующую полиномиальную модель:

$$Y = 6,501 + 0,879 \cdot X_1 + 1,347 \cdot X_2 + 1,067 \cdot X_3 + 1,716 \cdot X_4 - 0,128 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,981 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,216 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,138 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4. \quad (7)$$

Адекватность полученного выражения (7) экспериментальным данным проверяли по неравенству [16]

$$F_p < F_q(f_1, f_2), \quad (8)$$

где $F_p = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{S_{\text{ад}}^2}$ – расчетное значение F – критерия Фишера; f_1, f_2 – число степеней свободы

($f_1 = 3; f_2 = 16$); $S_{\text{ад}}^2$ – дисперсия адекватности, характеризующая отклонение экспериментальных данных от полученных по выражению (7):

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{n \cdot \varphi}{N - B};$$

φ – остаточная сумма квадратов

$$\left(\varphi = \frac{S_{j \max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} = 0,1100 \right);$$

B – число коэффициентов выражения; F_q – табличное (критическое) значение F – критерия Фишера ($F_{q(n-1; N; p)}$).

Согласно вычислениям, выражение с доверительной вероятностью 95 % адекватно, так как расчетное значение критерия Фишера меньше критического значения: $F_p = 0,103 < F_{q 3; 16; 0,95} = 3,240$ [15]. Также расчеты по выражению (7) показывают, что остаточное среднее квадратическое отклонение $\sigma_{\text{ост}} = 1,013$ меньше исходной нечеткости принятия решений экспертами 1,42. Как следует из анализа полученной математической модели, значимыми оказались и нелинейные члены разложения полинома, что подтверждает достаточно высокий профессионализм экспертов при прогнозировании урожайности крупноплодной клюквы в зависимости от принятых переменных.

Анализ выражения (7) показывает следующее:

а) наилучший показатель биологической потенциальной урожайности крупноплодной клюквы на промышленных плантациях с регулированием водно-воздушного и теплового режимов почвы достигается при $X_1 = +1, X_2 = +1, X_3 = +1, X_4 = +1$ и равен 11,50 т/га;

б) наихудший результат – 1,09 т/га – ожидается, когда уровень почвенной влаги низкий ($X_1 = -1$), имеет место на промышленном клюквенном чеке воздействие возвратных весенних заморозков ($X_2 = -1$), эффективность внесения минеральных удобрений низкая ($X_3 = -1$), уровень химической защита растений на чеках от сорняков, вредителей, болезней низкий ($X_4 = -1$);

в) фактор «химическая защита растений» на чеке (X_4) оказывает более существенное влияние на биологическую урожайность крупноплодной клюквы, а также на условия труда [20], нежели другие рассматриваемые факторы, о чем свидетельствуют значения коэффициентов в выражении (7):

$$X_4 = 1,716 > X_2 = 1,347 > X_3 = 1,067 > X_1 = 0,879;$$

г) результат численного эксперимента, при котором переменные X_1 и X_3 зафиксированы на определенных значениях ($X_1 = +1$; $X_3 = +1$), показывает существенное влияние факторов X_4 (химическая защита растений на чеке) и X_2 (воздействие возвратных весенних заморозков) на потери, которые могут составлять свыше 40 %:

$$Y(X_2; X_4) = 8,447 + 0,366 \cdot X_2 + 1,716 \cdot X_4 + 0,226 \cdot X_2 \cdot X_4; \quad (9)$$

д) несоблюдение требуемых показателей водно-воздушного и теплового режимов почвы на промышленных чеках крупноплодной клюквы ($X_1 = -1$; $X_2 = -1$), даже при качественном внесении минеральных удобрений ($X_3 = +1$) и соблюдении дозы и регламента использования средств химической защиты растений ($X_4 = +1$), сопровождается снижением урожайности ягод на 30,8 %.

Заключение. В результате проведенных исследований разработана математическая модель, которая позволяет прогнозировать эффективность и безопасность промышленного производства крупноплодной клюквы с учетом изменяющихся параметров (факторов) состояния производственной среды промышленных чеков. Установлено, что фактор «химическая защита растений» на чеках оказывает более существенное влияние на биологическую урожайность ягод, нежели другие рассматривают факторы («уровень почвенной влаги на чеке», «воздействие возвратных весенних заморозков», «эффективность внесения минеральных удобрений»). Несоблюдение же требуемых показателей водно-воздушного и теплового режимов почвы на промышленных чеках приводит к значительному снижению урожайности ягод.

Список использованных источников

1. Клюква крупноплодная в Белоруссии / Е. А. Сидорович, М. А. Кудинов, Н. Н. Рубан [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1987. – 238 с.
2. Черкасов, А. Ф. Основы технологии и агротехники плантационного возделывания клюквы / А. Ф. Черкасов // Нетрадиционные природные ресурсы, инновационные технологии и продукты: сб. науч. тр. / Рос. акад. естеств. наук, Междунар. акад. авт. науч. открытий и изобретений. – М., 2002. – Вып. 6. – С. 63–71.
3. Белорусское Полесье: стратегия и тактика комплексного освоения: 1966–2005 / под ред. И. В. Титова. – Минск: Беларусь, 2006. – 430 с.
4. Мисун, В. Л. Оценка загрязнения воздуха производственной среды при эксплуатации технических средств для внесения раствора пестицида на растения / В. Л. Мисун // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомств. темат. сб. / НАН Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2022. – Вып. 55. – С. 282–285.
5. Мисун, Л. В. Техносферная безопасность / Л. В. Мисун, Ал-й Л. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Минск: БГАТУ, 2023. – 208 с.
6. Организационно-технические мероприятия для повышения безопасности и улучшения условий труда операторов мобильной сельскохозяйственной техники / Л. В. Мисун, В. А. Агейчик, Ал-й Л. Мисун [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2012. – 188 с.
7. Технология промышленного выращивания клюквы крупноплодной на получение ягодной продукции: обзор. информ. / Е. А. Сидорович, Н. Н. Рубан, А. В. Шерстеникина [и др.]. – Минск: БелНИИТИ, 1992. – 120 с.
8. Мисун, Л. В. Технологические процессы и средства механизации промышленного выращивания брусничных культур / Л. В. Мисун. – Минск: БГАТУ, 2008. – 203 с.
9. Лягуский, В. Г. Экологическая безопасность химической защиты промышленных клюквенных плантаций / В. Г. Лягуский, Л. В. Мисун, В. Л. Мисун // Агропанорама. – 2007. – № 4. – С. 15–19.
10. Мисун, Л. В. Организация безопасной эксплуатации технических средств защиты растений в промышленном производстве клюквы / Л. В. Мисун, А. А. Зеленовский, В. Л. Мисун. – Минск: БГАТУ, 2011. – 122 с.
11. Мисун, В. Л. Улучшение условий и повышение безопасности труда при механизированном контактом внесении пестицидов на растения / В. Л. Мисун // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2021. – № 3. – С. 55–60.
12. Спесивцев, А. В. Нечетко-возможностный подход к формализации и использованию экспертных знаний для оценивания состояний сложных объектов / А. В. Спесивцев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 11. – С. 985–994. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-11-985-994>

13. Азаренко, В. В. Методические подходы оценки и управления производственным риском в растениеводческой отрасли АПК / В. В. Азаренко, А. Л. Мисун, А. Л. Мисун // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2017. – № 3. – С. 99–108.
14. Цымбал, А. А. Программирование урожая при автоматизированном проектировании агротехнологий возделывания черной смородины / А. А. Цымбал, Д. О. Хорт, И. Г. Смирнов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2011. – № 1. – С. 18–21.
15. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы обработки данных: в 2 т. / Н. Джонсон, Ф. Лион; пер. с англ. под ред. Э. К. Лецкого. – М.: Мир, 1980. – Т. 1. – 610 с.
16. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, 1965. – 511 с.
17. Леонов, А. Н. Основы научных исследований и моделирования: учеб.-метод. комплекс / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис. – Минск: БГАТУ, 2010. – 275 с.
18. Спесивцев, А. В. Выбор достаточного количества коэффициентов аппроксимирующего полинома в нечетком многомерном факторном пространстве / А. В. Спесивцев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 33–36.
19. Шарапов, С. В. Критерий информативности полиномиальной модели на основе функций принадлежности специального типа / С. В. Шарапов, А. В. Спесивцев, А. В. Вагин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2012. – № 1. – С. 70–75.
20. Дашков, В. Н. К вопросу применения средств защиты органов дыхания, глаз и кожи при работе с пестицидами в растениеводческой отрасли АПК / В. Н. Дашков, Л. В. Мисун, В. Л. Мисун // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомств. темат. сб. / НАН Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2020. – Вып. 54. – С. 50–53.

References

1. Sidorovich E. A., Kudinov M. A., Ruban N. N., Sherstenikina A. V., Rupasova Zh. A., Shapiro D. K., Gorlenko S. V. *Large-fruited cranberries in Byelorussia*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1987. 238 p. (in Russian).
2. Cherkasov A. F. Fundamentals of technology and agricultural engineering of plantation cultivation of cranberries. *Netraditsionnye prirodnye resursy, innovatsionnye tekhnologii i produkty: sbornik nauchnykh trudov* [Untraditional natural resources, innovation technologies and products: collected scientific works]. Moscow, 2002, iss. 6, pp. 63–71 (in Russian).
3. Titov I. V. (ed.). *Belarusian Polessie: strategy and tactics of integrated exploration: 1966–2005*. Minsk, Belarus' Publ., 2006. 430 p. (in Russian).
4. Misun V. L. Assessment of air pollution in the production environment during the operation of technical means for applying a pesticide solution to plants. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva: mezhvedomstvennyi tematicheskii sbornik* [Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental subject collection]. Minsk, 2022, iss. 55, pp. 282–285 (in Russian).
5. Misun L. V., Misun Al-i L., Misun Al-r L. *Technosphere safety*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 2023. 208 p. (in Russian).
6. Misun L. V., Ageichik V. A., Misun Al-i L., Gurina A. N., Misun Al-r L. *Organizational and technical measures to increase safety and improve working conditions for operators of mobile agricultural equipment*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 2012. 188 p. (in Russian).
7. Sidorovich E. A., Ruban N. N., Sherstenikina A. V., Volod'ko I. K., Galynskaya N. A., Marmalyukov V. P., Paseko A. P. *Technology of industrial cultivation of large-fruited cranberries to obtain berry products*. Minsk, Belarusian Research Institute of Scientific, Technical, Information and Technical-Economic Research, 1992. 120 p. (in Russian).
8. Misun L. V. *Technological processes and means of mechanization of industrial cultivation of lingonberry crops*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 2008. 203 p. (in Russian).
9. Lyaguski V. G., Misun L. V., Misun V. L. Environmental safety of chemical protection of industrial cranberry plantations. *Agropanorama*, 2007, no. 4, pp. 15–19 (in Russian).
10. Misun L. V., Zelenovskii A. A., Misun V. L. *Organisation of safe operation of technical means of plant protection in industrial cranberry production*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 2011. 122 p. (in Russian).
11. Misun V. L. Improvement of working conditions and safety during mechanized contact application of pesticides to plants. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki = Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences*, 2021, no. 3, pp. 55–60 (in Russian).
12. Spesivtsev A. V. Fuzzy-probabilistic approach to formalizing and using expert knowledge to evaluate complex objects states. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*, 2020, vol. 63, no. 11, pp. 985–994 (in Russian).

13. Azarenko V. V., Misun A. L., Misun A. L. Methodological approaches to assessment and management of manufacturing risk in the plant-growing sector of the AIC. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2017, no. 3, pp. 99–108 (in Russian).

14. Tsymbal A. A., Khort D. O., Smirnov I. G. Yield programming in automated designing of agro-technologies of blackcurrant cultivation. *Sel'skokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*, 2011, no. 1, pp. 18–21 (in Russian).

15. Johnson N. L., Leone F. C. *Statistics and experimental design in engineering and the physical sciences*. 2nd ed. New York, Wiley, 1977. 1090 p.

16. Smirnov N. V., Dunin-Barkovskii I. V. *A course in probability theory and mathematical statistics for technical applications*. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1965. 511 p. (in Russian).

17. Leonov A. N., Dechko M. M., Lovkis V. B. *Fundamentals of scientific research and modeling*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 2010. 275 p. (in Russian).

18. Spesivtsev A. V. Selection of a sufficient number of coefficients of an approximating polynomial in a fuzzy multidimensional factor space. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*, 2008, no. 4, pp. 33–36 (in Russian).

19. Sharapov S. V., Spesivtsev A. V., Vagin A. V. Criterion for assessing informativeness of the polynomial model based on the membership functions of a special type. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of Risk Management in the Technosphere*, 2012, no. 1, pp. 70–75 (in Russian).

20. Dashkov V. N., Misun L. V., Misun V. L. To the question of application respiratory protection equipment, eyes and skin when working with pesticides in the plant industry of AIC. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva: mezhvedomstvennyi tematicheskii sbornik [Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental subject collection]*. Minsk, 2020, iss. 54, pp. 50–53 (in Russian).

Информация об авторах

Азаренко Владимир Витальевич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, доцент, академик-секретарь Отделения аграрных наук Национальной академии наук Беларуси, Президиум Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-2122-3281>. E-mail: azarenko@presidiun.basnet.by

Мисун Владимир Леонидович – старший преподаватель кафедры экономики и организации предприятий АПК, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: SLM_90@mail.ru

Мисун Алексей Леонидович – кандидат технических наук, доцент кафедры управления охраной труда, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: LLM_90@mail.ru

Information about the authors

Vladimir V. Azarenko – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Academic Secretary of the Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-2122-3281>. E-mail: azarenko@presidiun.bas-net.by

Vladimir L. Misun – Senior Lecture of the Department of Economics and Organization of Agricultural Enterprises, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: SLM_90@mail.ru

Aleksey L. Misun – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department of Security Management, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: LLM_90@mail.ru