

РОСТОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗА ПРОДУКТИВНОСТИ  
*TRITICUM AESTIVUM* L. СОРТА ЛЮБАВА НА ФОНЕ ПРЕДПОСЕВНОЙ  
ОБРАБОТКИ СЕМЯН И НЕКОРНЕВОЙ ПОДКОРМКИ  
ГУМИНОВЫМ КОМПЛЕКСОМ «ЭКОБИОСФЕРА Б»

В.С. ВИНОГРАДОВА<sup>1</sup>, С.А. БОРОДИЙ<sup>1</sup>, И.И. ГОЛОКТИОНОВ<sup>2</sup>, О.Г. КАРАТАЕВА<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Костромская ГСХА

<sup>2</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева)

*Приведены результаты разработки ростовых моделей прогноза урожайности яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Любава, основанных на значении эмпирических параметров посева, полученных в ранние фазы развития растения, прогнозируемых тепловых ресурсов периода вегетации текущего года и коэффициентов эффективности препарата «Экобиосфера Б» в условиях опытного поля Костромской ГСХА (Костромской район Костромской области). Установлено, что гуминовый комплекс «Экобиосфера Б» оказывал влияние на развитие растений *T. aestivum* L. Любава, сокращая межфазный период в середине вегетации на 7 суток по сравнению с контрольными (без обработки) растениями. Рассчитана теплоемкость фенологических фаз развития, обеспечивающая возможность прогнозирования календарных сроков фенологических фаз развития от даты посева до уборочной спелости на основании прогноза тепловых ресурсов текущего года. Имитационно-динамические ростовые модели сезонного прогноза фитометрических параметров, с корректировкой на эффективность нормы расхода и кратности применения гуминового комплекса «Экобиосфера Б» как регулятора роста и развития, работали с точностью: «Экобиосфера Б» (0,5 л/т семян + 0,5 л/га в фазу кущения): высота растения – 98,32%, массы фитоорганов влажностью 13%: наземная активная фитомасса – 95,1%, листьев – 83,54%, стебля – 91,08%, элементов колоса – 87,23%, плодов – 98,24%; «Экобиосфера Б» (1,0 л/т семян + 1,0 л/га в фазу кущения): высота растения – 98,47%, массы фитоорганов влажностью 13%: наземная активная фитомасса – 87,5%, листьев – 64,57%, стебля – 85,46%, элементов колоса – 61,09%, плодов – 96,11%. Модели обеспечивают возможность прогнозировать продуктивность растений и урожайность *T. aestivum* L. Любава в производственных условиях минимум за 80–90 суток до уборочной спелости и при необходимости скорректировать технологию возделывания культуры в течение периода вегетации с целью повышения экономической эффективности производства.*

**Ключевые слова:** яровая пшеница, *Triticum aestivum* L., сорт, семена, прогноз, рост, фенологические фазы, математическая имитационно-динамическая модель.

## Введение

Разработка и внедрение в сельскохозяйственное производство цифровых технологий подразумевают создание искусственного интеллекта, помогающего принимать оптимальные решения для управления продукционным процессом растений. В настоящее время накоплены обширные фактические данные по управлению продукционным процессом растений на основе эффективности технологических операций на урожайность культур: например, эффективность гуматов, способов обработки почвы, средств защиты растений от вредоносных объектов, применения ассортимента и норм минеральных и органических удобрений и др. [2, 6].

Постоянное совершенствование способов управления формированием урожая требует изучения эффективности новых препаратов, одним из которых

является удобрительный комплекс «Экобиосфера Б», разработанный на предприятии ООО «ЭкоБиосфера» (Россия).

Применяемые в настоящее время методики планирования урожайности основаны на параметрах структуры урожая [4], обеспечение которых и является задачей производителя продукции растениеводства. Практическое применение этой методики часто затруднено вследствие сотен неучтенных взаимодействующих и взаимозависимых факторов окружающей среды. Следовательно, в процессе вегетации растений необходим мониторинг агроценозов на ранних стадиях развития растений, что обеспечит возможность оценки экономической и биологической целесообразности способа управления формированием урожая задолго до уборки продукции. Для этого требуются имитационно-мониторинговые динамические ростовые модели, адаптированные к эффективности конкретного способа и культурному растению. Необходимо разработка таких моделей для яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.).

**Цель исследований:** разработка имитационно-динамических моделей сезонного прогноза для управления ростом и развитием *T. aestivum* L. Любава в производственных условиях на фоне предпосевной обработки семян и некорневой подкормки препаратом «Экобиосфера Б».

### Материал и методы исследований

Исследования проводили на опытном поле ФГБОУ ВО «Костромская ГСХА» в 2023 г. Семена яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Любава обрабатывали перед посевом гуминовым комплексом «Экобиосфера Б». Посев проводили 06.05.2023 г. на фоне естественного плодородия почвы. В фазу кущения (6 июня) растения обработали этим же комплексом в соответствии со схемой опыта. Почва участка – дерново-подзолистая, среднесуглинистая; pH – 4,86; содержание в почве гумуса – 1,74%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–182,0 мг/кг, K<sub>2</sub>O – 73,0 мг/кг, Ca – 3,99 моль/100 г, Mg – 0,56 моль/100 г. Предшественник – лен-долгунец (*Linum usitatissimum* L.). Технология возделывания – общепринятая для Костромской области: зяблевая вспашка на глубину 20,0–22,0 см; предпосевная культивация с выравниванием и прикатыванием на глубину 4,0–5,0 см; норма высева всхожих семян – 4,5 млн шт/га; глубина заделки семян – 4,0–5,0 см. Для защиты растений от сорняков применялся гербицид Агритокс (0,9 л/га) в фазу начала кущения.

Состав гуминового комплекса «Экобиосфера Б»: массовая доля сухого вещества – 6,0...7,0%, органического вещества в сухом веществе – 85,0...95,0%, гуминовых кислот – 75,0...85,0%, фульвокислот – 10,0...15,0%; pH<sub>KCl</sub> – 9,0...10,0; N – 0,4%; P – 0,3%; K – 1,3%.

Схема опыта включала в себя 3 варианта:

1. Без обработки семян (контроль).

2. «Экобиосфера Б» 0,5 л/т семян + 0,5 л/га в кущение (далее – Семена 0,5+K0,5).

3. «Экобиосфера Б» 1,0 л/т семян + 1,0 л/га в кущение (далее – Семена 1,0+K1,0).

Повторность опыта – 3-кратная. Площадь опытной делянки – 15 м<sup>2</sup>.

Обработку проводили методом опрыскивания вегетирующих растений в фазу кущения (06.06.2023 г.) ранцевым опрыскивателем из расчета 200 л/га рабочего раствора.

Учет фенологических фаз развития растений регистрировали по общепринятой методике [5]. При этом в каждой выборке рассчитывали процент растений, достигших той или иной фазы, что обеспечило возможность оценить выровненность развития стеблестоя.

Динамику наземной фитомассы учитывали с интервалом 7 суток от всходов до твердой спелости зерновки. Единичная учетная выборка состояла из 10 растений

в 4-кратной повторности. Измеряли высоту центрального стебля, разделяли наземную часть растения на отдельные фитоорганы, которые взвешивали после подсушивания до влажности 13%. Параметром времени в математических моделях является суммарная энтальпия воздуха, прогноз которой на текущий год, по нашим предыдущим исследованиям, соответствует эмпирическим данным на 99,0...99,50% [7, 8, 10].

Статистическую обработку данных производили с использованием общепринятых методик [3]. Аппроксимацию экспериментальных данных, расчет коэффициентов регрессии и верификацию динамических моделей выполняли при помощи программного пакета Microsoft Office Excel 2019.

### Результаты и их обсуждение

**Динамика фенологических фаз развития.** Нами отмечалось, что обработка семян гуминовым комплексом «Экобиосфера Б» оказывает влияние на развитие *T. aestivum* L., ускоряя его на 7 суток от фазы второго листа до восковой спелости зерновок по сравнению с контрольным (без обработки) вариантом [9]. Обработка растений в фазу кущения способствовала продлению этой тенденции вплоть до начала твердой спелости, причем вариант с дозой препарата 1,0 л/га несколько уступал варианту с дозой 0,5 л/га (табл. 1).

Для сезонного прогноза фенологических фаз развития *T. aestivum* L. с учетом эффекта обработки семян и посева гуминовым комплексом «Экобиосфера Б» была рассчитана тепломкость фаз, обеспечивающая точность прогноза календарных сроков на уровне 95,0–97,0% (табл. 2) [10].

**Динамика высоты растения.** Модель динамики высоты, равно как и динамики других фитоорганов растения, изначально была рассчитана для контрольного (без обработки гуминовым комплексом «Экобиосфера Б») варианта [9]. Эффект дозирования и кратности применения препарата учтен путем введения в исходные уравнения корректирующего коэффициента при обработке семян [1] и в фазу кущения.

Действие гуминового комплекса наблюдалось уже на 3–4-е сутки после обработки растений в фазу кущения, поскольку высота главного стебля *T. aestivum* L. увеличилась на 31,77–31,98% по сравнению с тем же показателем в контрольном варианте (рис. 1).

Таблица 1

**Динамика фенологических фаз развития *T. aestivum* L. Любава на фоне обработки семян и вегетирующих растений препаратом «Экобиосфера Б», % растений, 2023 г.**

Фенологическая фаза развития	Вариант	Дата											
		14.05	19.05	26.05	01.06	30.06	06.07	14.07	20.07	29.07	04.08	11.08	18.08
всходы	Без обработки (контроль) <sup>1</sup>	100											
	Семена 0,5+K0,5 <sup>2</sup>	100											
	Семена 1,0+K1,0 <sup>3</sup>	100											
1-й лист	Без обработки (контроль)		100										
	Семена 0,5+K0,5		100										
	Семена 1,0+K1,0												

Фенологическая фаза развития	Вариант	Дата											
		14.05	19.05	26.05	01.06	30.06	06.07	14.07	20.07	29.07	04.08	11.08	18.08
2-й лист	Без обработки (контроль)			70									
	Семена 0,5+K0,5			30									
	Семена 1,0+K1,0		100										
3-й лист	Без обработки (контроль)			30	60								
	Семена 0,5+K0,5			70	78								
	Семена 1,0+K1,0			100									
колошение	Без обработки (контроль)					10	10						
	Семена 0,5+K0,5					100							
	Семена 1,0+K1,0					90							
цветение	Без обработки (контроль)						10	30					
	Семена 0,5+K0,5						80	10					
	Семена 1,0+K1,0						60	30					
формирование зерновки	Без обработки (контроль)							70	10				
	Семена 0,5+K0,5							90					
	Семена 1,0+K1,0							70	20				
молочная спелость	Без обработки (контроль)								90	60			
	Семена 0,5+K0,5								100	20			
	Семена 1,0+K1,0								80	40			
молочно-восковая спелость	Без обработки (контроль)									40	80		
	Семена 0,5+K0,5									80	20		
	Семена 1,0+K1,0									60	50		
восковая спелость	Без обработки (контроль)										20	100	
	Семена 0,5+K0,5										80	100	
	Семена 1,0+K1,0										50	100	
твердая спелость	Без обработки (контроль)												100
	Семена 0,5+K0,5												100
	Семена 1,0+K1,0												100

**Примечание.** 1 – Без обработки – без обработки семян и посева; 1 – Семена 0,5 + K0,5 – «Экобиосфера Б» 0,5 л/т семян + 0,5 л/га в кушение; 3 – Семена 1,0 + K1,0 – «Экобиосфера Б» 1,0 л/т семян + 1,0 л/га в кушение.

**Теплоемкость фенологических фаз развития *T. aestivum* L. Любава на фоне обработки семян и вегетирующих растений гуминовым комплексом «Экобиосфера Б»**

Фаза развития	Без обработки семян (контроль)		Экобиосфера Б 0,5 л/т семян + + 0,5 л/га в кушение		Экобиосфера Б 1,0 л/т семян + +1,0 л/га в кушение	
	Календарная дата наступления фазы	Суммарная энтальпия воздуха, кДж/кг	Календарная дата наступления фазы	Суммарная энтальпия воздуха, кДж/кг	Календарная дата наступления фазы	Суммарная энтальпия воздуха, кДж/кг
Посев	06.05.2023	0	06.05.2023	0	06.05.2023	0
Всходы	14.05.2023	159,59	14.05.2023	159,59	14.05.2023	159,59
1-й лист	19.05.2023	315,50	19.05.2023	315,50	*	*
2-й лист	26.05.2023	582,30	26.05.2023	582,30	19.05.2023	315,50
3-й лист	01.06.2023	745,23	01.06.2023	745,23	26.05.2023	582,30
Кушение	09.06.2023	1017,88	09.06.2023	1017,88	09.06.2023	1017,88
Выход в трубку	23.06.2023	1438,95	16.06.2023	1234,92	16.06.2023	1234,92
Колошение	30.06.2023	1716,27	30.06.2023	1716,27	30.06.2023	1716,27
Цветение	06.07.2023	1972,98	06.07.2023	1972,98	06.07.2023	1972,98
Формирование зерновки	14.07.2023	2294,83	14.07.2023	2294,83	14.07.2023	2294,83
Молочная спелость	20.07.2023	2560,82	20.07.2023	2560,82	20.07.2023	2560,82
Молочно-восковая спелость	04.08.2023	3259,13	29.07.2023	2963,03	29.07.2023	2963,03
Восковая спелость	11.08.2023	3642,04	04.08.2023	3259,13	04.08.2023	3259,13
Твердая спелость	18.08.2023	4001,35	18.08.2023	4001,35	18.08.2023	4001,35

\*Нет данных.

Система уравнений, составляющая модель прогноза высоты растений *T. aestivum* L., представлена в таблице 3.

Включение в регрессионные уравнения динамического коэффициента ( $h'$ ) и коэффициента обработки ( $H''$ ) обеспечивает динамичность модели с учетом эффективности 2-кратного применения препарата «Экобиосфера Б»:

$$\begin{aligned}
 h_s &= h + (h \cdot H''); \\
 h &= f(Cp) + h'; \\
 h' &= hf - f(Cpf),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $h_s$  – прогнозируемая высота растения, см;  $h$  – расчетная высота растения, см (табл. 3);  $Cp$  – суммарная энтальпия воздуха, КДж/кг;  $H''$  – коэффициент обработки (табл. 3);  $f(Cp)$  – уравнение динамики высоты растения (табл. 3);  $h'$  – динамический коэффициент;  $hf$  – эмпирическая высота растения на календарную дату начала расчета прогноза, см;  $Cpf$  – суммарная энтальпия воздуха от календарной даты посева до даты учета, КДж/кг.

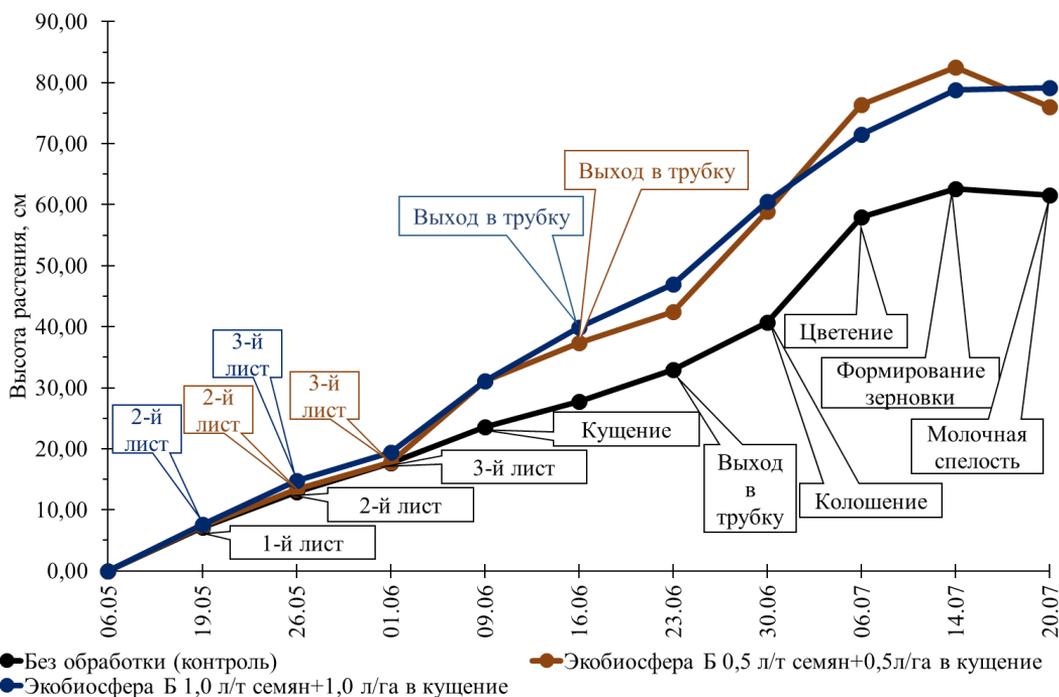


Рис. 1. Динамика высоты растения *T. aestivum* L. Любава, 2023 г. (ориг.)

Таблица 3

**Система уравнений динамики высоты растений *T. aestivum* L. Любава**

Диапазон суммарной энтальпии воздуха, $C_p$ , КДж/кг	Уравнение динамики высоты растения, см	Коэффициент обработки $H''$	
		«Экобиосфера Б» 0,5 л/т семян + + 0,5 л/га в кущение	«Экобиосфера Б» 1,0 л/т семян + + 1,0 л/га в кущение
315,50...1017,87	$h = 0,0201 \cdot C_p^{1,0195}$	0,0000	0,0000
1017,88...1716,26	$h = 0,0201 \cdot C_p^{1,0195}$	0,3198	0,3177
1716,27...1972,97	$h = 0,0674 \cdot C_p - 74,8850$	0,3198	0,3177
1972,98...2560,82	$h = 30,5070 \cdot \ln(C_p) - 173,4600$	0,3198	0,3177

Эмпирические данные динамики высоты в течение периода вегетации пшеницы соответствовали расчетным на 98,32% в варианте Семена 0,5+К0,5 и 98,47% в варианте Семена 1,0+К1,0 (табл. 4).

Прогноз динамики высоты посева рекомендуется для заблаговременного принятия решения о необходимости обработки посева ретардантами при опасности полегания стеблестоя.

Верификация модели прогноза динамики высоты *T. aestivum* L. Любава

Дата учета	Суммарная энтальпия воздуха, КДж/кг	Высота, см			
		«Экобиосфера Б» 0,5 л/т семян + + 0,5 л/га в кущение		«Экобиосфера Б» 1,0 л/т семян + + 1,0 л/га в кущение	
		Э	П	Э	П
19.05.2023	315,50	7,37	7,37	7,63	7,63
26.05.2023	582,30	13,42	13,53	14,78	13,79
01.06.2023	745,23	17,82	17,32	19,46	17,58
09.06.2023	1017,88	31,16	31,27	31,11	31,56
16.06.2023	1234,92	37,31	38,00	39,96	38,28
23.06.2023	1438,95	42,49	44,35	46,94	44,62
30.06.2023	1716,27	58,86	54,20	60,54	54,46
06.07.2023	1972,98	76,32	76,92	71,56	77,14
14.07.2023	2294,83	82,49	83,00	78,85	83,21
20.07.2023	2560,82	76,03	87,42	79,15	87,62
R <sup>2</sup>		0,9832		0,9847	

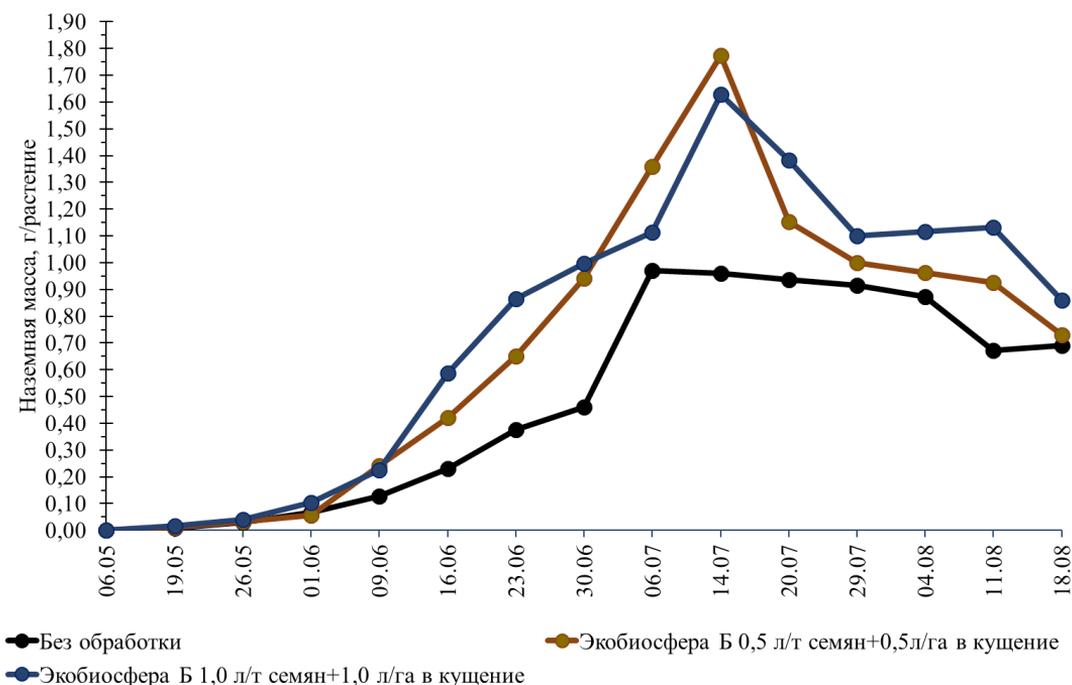
**Примечание.** Э – эмпирическое значение; П – прогнозируемое значение.

**Динамика активной наземной фитомассы.** Наземная активная (фотосинтезирующая) фитомасса при 2-кратной обработке *T. aestivum* L. на 3–4-е сутки после подкормки в фазу кушения увеличилась на 76,56–88,28% относительно растений контрольного варианта (рис. 2).

Аппроксимация сезонной динамики фитомассы системой уравнений (табл. 5) с учетом динамического коэффициента и коэффициента обработки обеспечила точность работы прогностической модели (2) на уровне 87,5–95,1% (табл. 6).

$$\begin{aligned}
 Ma_s &= Ma + (Ma * M''); \\
 Ma &= f(Cp) + Ma'; \\
 Ma' &= Maf - f(Cpf),
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $Ma_s$  – прогнозируемая наземная активная фитомасса (влажность 13%), г/растение;  $Ma$  – расчетная наземная активная фитомасса (влажность 13%), г/растение (табл. 5);  $Cp$  – суммарная энтальпия воздуха, КДж/кг;  $M''$  – коэффициент обработки (табл. 5);  $f(Cp)$  – уравнение динамики воздушно-сухой (13%) наземной активной фитомассы растения (табл. 5);  $Ma'$  – динамический коэффициент, г/растение;  $Maf$  – эмпирическая наземная активная фитомасса (13%-ной влажности) на календарную дату учета, г/растение;  $Cpf$  – эмпирическая суммарная энтальпия воздуха от календарной даты посева до календарной даты учета, КДж/кг.



**Рис. 2.** Динамика наземной активной фитомассы (влажность 13%) *T. aestivum* L. Любава, 2023 г. (ориг.).

Таблица 5

**Система уравнений динамики наземной активной фитомассы растений *T. aestivum* L. Любава**

Диапазон суммарной энталпии воздуха, Ср, КДж/кг	Уравнение динамики наземной активной фитомассы, г/растение	Коэффициент обработки $M''$	
		«Экобиосфера Б» 0,5 л/т семян + + 0,5 л/га в кушение	«Экобиосфера Б» 1,0 л/т семян + + 1,0 л/га в кушение
315,50...1017,87	$Ma = 0,0069 \cdot e^{0,0026Cp}$	0,0000	0,0000
1017,88...1972,97	$Ma = 0,0069 \cdot e^{0,0026Cp}$	0,8828	0,7656
1972,98...2294,82	$Ma = -7E - 0,5 \cdot Cp + 1,1265$	0,8828	0,7656
2294,83...2560,81	$Ma = -7E - 0,5 \cdot Cp + 1,1265$	0,8489	0,6969
2560,82...3259,12	$Ma = -7E - 0,5 \cdot Cp + 1,1265$	0,2288	0,4763
3259,13...4001,35	$Ma = 11382 \cdot Cp^{-1,177}$	0,2288	0,4763

**Динамика массы листьев.** Увеличение массы листьев *T. aestivum* L. в вариантах с применением комплекса «Экобиосфера Б» по сравнению с контрольным, наблюдавшееся еще в начале вегетации как эффект обработки семян [1], при обработке в фазу кушения проявилось к середине июня, то есть к фазе начала выхода в трубку (рис. 3).

**Верификация модели прогноза динамики массы фитоорганов (влажность 13%)  
T. aestivum L. Любава**

Дата учета	Суммарная энтальпия воздуха, кДж/кг	Наземная активная фитомасса, г/растение		Масса листьев, г/растение		Масса стебля, г/растение		Масса элементов колоса, г/растение		Масса плодов, г/растение	
		Э	П	Э	П	Э	П	Э	П	Э	П
<b>«Экобиосфера Б» 0,5 л/т семян + 0,5 л/га в кушение</b>											
19.05.2023	315,50	0,012	0,012	0,012	0,012						
26.05.2023	582,30	0,033	0,028	0,033	0,027						
01.06.2023	745,23	0,056	0,044	0,046	0,038	0,010	0,008				
09.06.2023	1017,88	0,241	0,176	0,149	0,119	0,092	0,068				
16.06.2023	1234,92	0,421	0,315	0,209	0,165	0,212	0,160				
23.06.2023	1438,95	0,652	0,541	0,220	0,205	0,432	0,326				
30.06.2023	1716,27	0,941	1,119	0,145	0,167	0,666	0,642	0,130	0,124		
06.07.2023	1972,98	1,358	1,854	0,120	0,191	0,917	1,147	0,151	0,189		
14.07.2023	2294,83	1,775	1,779	0,086	0,095	1,289	1,055	0,400	0,328		
20.07.2023	2560,82	1,152	1,159	0,028	0,020	0,801	0,655	0,148	0,124	0,175	0,251
29.07.2023	2963,03	0,999	1,125			0,345	0,315	0,146	0,149	0,508	0,544
04.08.2023	3259,13	0,963	1,021					0,140	0,177	0,629	0,672
11.08.2023	3642,04	0,927	0,895					0,177	0,139	0,750	0,772
18.08.2023	4001,35	0,730	0,801							0,730	0,829
R <sup>2</sup>		0,9510		0,8354		0,9108		0,8723		0,9824	
<b>«Экобиосфера Б» 1,0 л/т семян + 1,0 л/га в кушение</b>											
19.05.2023	315,50	0,016	0,016	0,016	0,016						
26.05.2023	582,30	0,041	0,032	0,041	0,030						
01.06.2023	745,23	0,104	0,048	0,077	0,039	0,027	0,012				
09.06.2023	1017,88	0,226	0,172	0,148	0,108	0,078	0,060				
16.06.2023	1234,92	0,588	0,303	0,300	0,144	0,288	0,139				
23.06.2023	1438,95	0,864	0,514	0,301	0,171	0,563	0,342				
30.06.2023	1716,27	0,998	1,057	0,190	0,182	0,680	0,764	0,128	0,128		

Дата учета	Суммарная энтальпия воздуха, кДж/кг	Наземная активная фитомасса, г/растение		Масса листьев, г/растение		Масса стебля, г/растение		Масса элементов колоса, г/растение		Масса плодов, г/растение	
		Э	П	Э	П	Э	П	Э	П	Э	П
06.07.2023	1972,98	1,114	1,746	0,128	0,179	0,843	1,318	0,143	0,274		
14.07.2023	2294,83	1,629	1,640	0,113	0,089	1,154	1,149	0,362	0,380		
20.07.2023	2560,82	1,384	1,399	0,053	0,044	0,917	0,925	0,172	0,209	0,242	0,349
29.07.2023	2963,03	1,100	1,357			0,331	0,410	0,164	0,158	0,605	0,686
04.08.2023	3259,13	1,116	1,232					0,170	0,166	0,667	0,828
11.08.2023	3642,04	1,132	1,081					0,222	0,176	0,910	0,938
18.08.2023	4001,35	0,860	0,968							0,860	0,999
R <sup>2</sup>		0,8750		0,6457		0,8546		0,6109		0,9611	

Примечание. Э – эмпирическое значение; П – прогнозируемое значение.

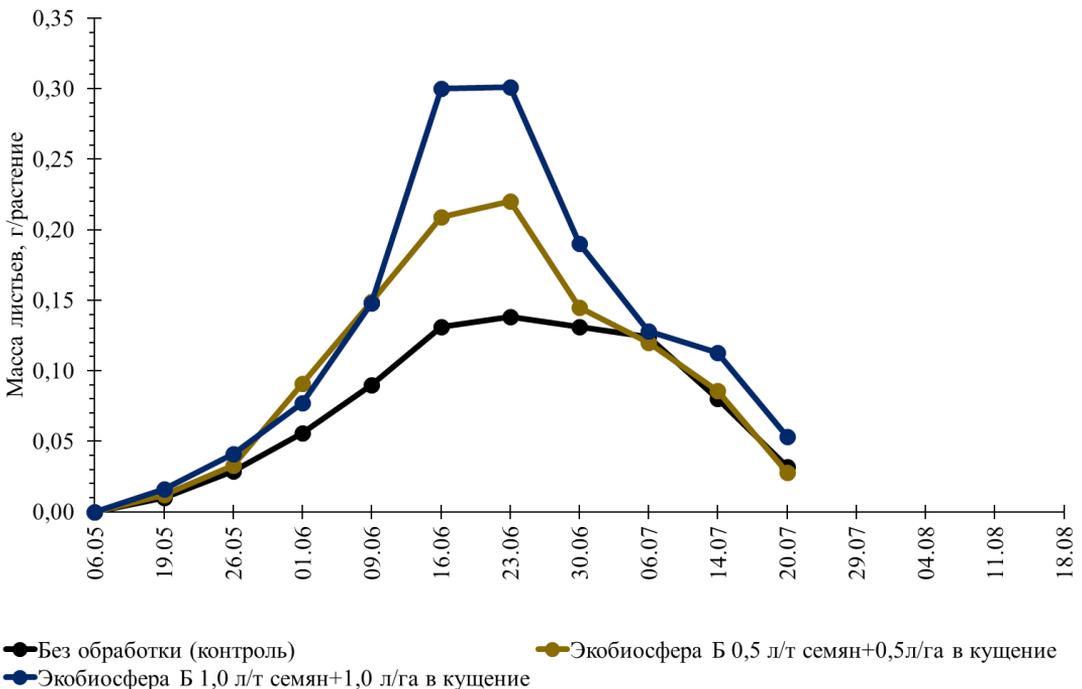


Рис. 3. Динамика массы листьев (влажность 13%) *T. aestivum* L. Любава, 2023 г. (ориг.)

Поскольку методика учета эмпирической массы листьев, примененная нами в эксперименте и заключающаяся в отделении листьев от остальных фитоорганов, в условиях сельскохозяйственного предприятия является неприменимой вследствие ее трудоемкости при неизбежно большом количестве учетных выборок, модель

прогноза массы листьев (равно как и других фитоорганов) *T. aestivum* L. построена на произведении прогнозируемой величины наземной активной фитомассы и прогнозируемого коэффициента листьев, а также других фитоорганов:

$$M(l, s, g, p) = Ma_s \cdot K(l, s, g, p), \quad (3)$$

где  $Ma_s$  – прогнозируемые значения надземной активной фитомассы, г/растение (влажность 13%);  $Kl, Ks, Kg, Kp$  – соответственно прогнозируемые коэффициенты листьев, стебля, элементов колоса, плодов, безразмерные;  $Ml, Ms, Mg, Mp$  – соответственно прогнозируемая масса листьев, стебля, элементов колоса, плодов, г/растение (влажность 13%).

На период вегетации *T. aestivum* L. динамика коэффициента листьев ( $Kl$ ) аппроксимирована системой уравнений индивидуально для каждой дозы препарата «Экобиосфера Б» (табл. 7).

Прогнозируемая масса листьев *T. aestivum* L. соответствовала эмпирическим значениям на 83,54% в варианте Семена 0,5+K0,5 и на 64,57% в варианте Семена 1,0+K1,0 (табл. 6).

В практике производства продукции урожайность пшеницы ( $Y$ ) рассчитывается как произведение массы одного растения ( $Ma_s$ ) (или фитооргана растения ( $M(l, s, g, p)$ )) на количество растений на единице площади ( $G$ ):

$$Y = Ma_s \cdot G. \quad (4)$$

**Динамика массы стебля.** Интенсивный рост стебля *T. aestivum* L. наблюдался от фазы выхода в трубку и продолжался до цветения, что объясняется биологическими особенностями однолетнего растения (рис. 4).

Сезонная динамика коэффициента стебля ( $Ks$ ) рассчитывается в зависимости от суммарной энтальпии воздуха ( $Cp$ ) по системе уравнений (табл. 8).

Точность работы модели (3) составляла 85,46–91,08% в зависимости от варианта опыта (табл. 6).

**Динамика массы элементов колоса.** Масса элементов колоса *T. aestivum* L. складываясь из хозяйственно-непродуктивных частей соцветия (ось, колосковые и цветковые чешуи), достигала максимума в середине июля, что соответствовало фазе формирования и роста зерновки (рис. 5).

Таблица 7

### Система уравнений динамики коэффициента листьев растений *T. aestivum* L. Любава

Диапазон суммарной энтальпии воздуха, $Cp$ , КДж/кг	Уравнение динамики коэффициента листьев ( $Kl$ )	
	«Экобиосфера Б» 0,5 л/т семян + 0,5 л/га в кушение	«Экобиосфера Б» 1,0 л/т семян + 1,0 л/га в кушение
315,50...582,29	$Kl = 1,0000$	$Kl = 1,0000$
582,30...1716,26	$Kl = -0,0007 \cdot Cp + 1,2892$	$Kl = -0,0007 \cdot Cp + 1,3393$
1716,27...2560,82	$Kl = -0,0007 \cdot \ln(Cp) + 2,5992$	$Kl = 5,3182 \cdot e^{-0,0002Cp}$
$R^2$	0,9957	0,9902

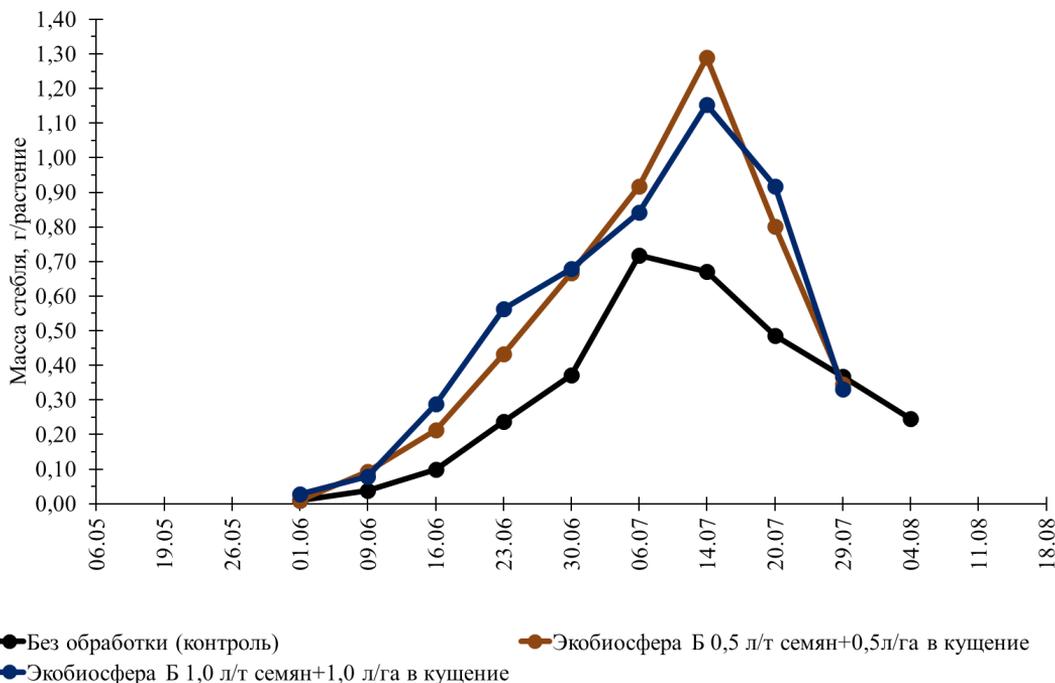


Рис. 4. Динамика массы стебля (влажность 13%) *T. aestivum* L. Любава, 2023 г.(ориг.)

Таблица 8

Система уравнений динамики коэффициента стебля растений *T. aestivum* L. Любава

Диапазон суммарной энтальпии воздуха, $C_p$ , КДж/кг	Уравнение динамики коэффициента стебля ( $K_s$ )	
	«Экобиосфера Б» 0,5 л/т семян + 0,5 л/га в кушение	«Экобиосфера Б» 1,0 л/т семян + 1,0 л/га в кушение
745,23...1972,97	$K_s = 0,6273 \cdot \ln(C_p) - 3,9579$	–
1972,98...2560,81	$K_s = 16,152 \cdot C_p^{-0,401}$	–
2560,82...2963,03	$K_s = -2,399 \cdot \ln(C_p) + 19,522$	–
745,23...1438,94	–	$K_s = 0,0924 \cdot e^{-0,0013C_p}$
1438,95...1972,97	–	$K_s = 0,4319 \cdot e^{0,0003C_p}$
1972,98...2963,02	–	$K_s = -0,359 \cdot \ln(C_p) + 3,4789$
2963,02...2963,03	–	$K_s = -2,479 \cdot \ln(C_p) + 20,119$
$R^2$	0,9903	0,9917

Модель прогноза динамики массы элементов колоса *T. aestivum* L., по прогнозу соответствующего коэффициента, описанного системой уравнений (табл. 9), работала с точностью 61,09–87,23% в зависимости от дозы и кратности обработки препаратом «Экобиосфера Б» (табл. 6).

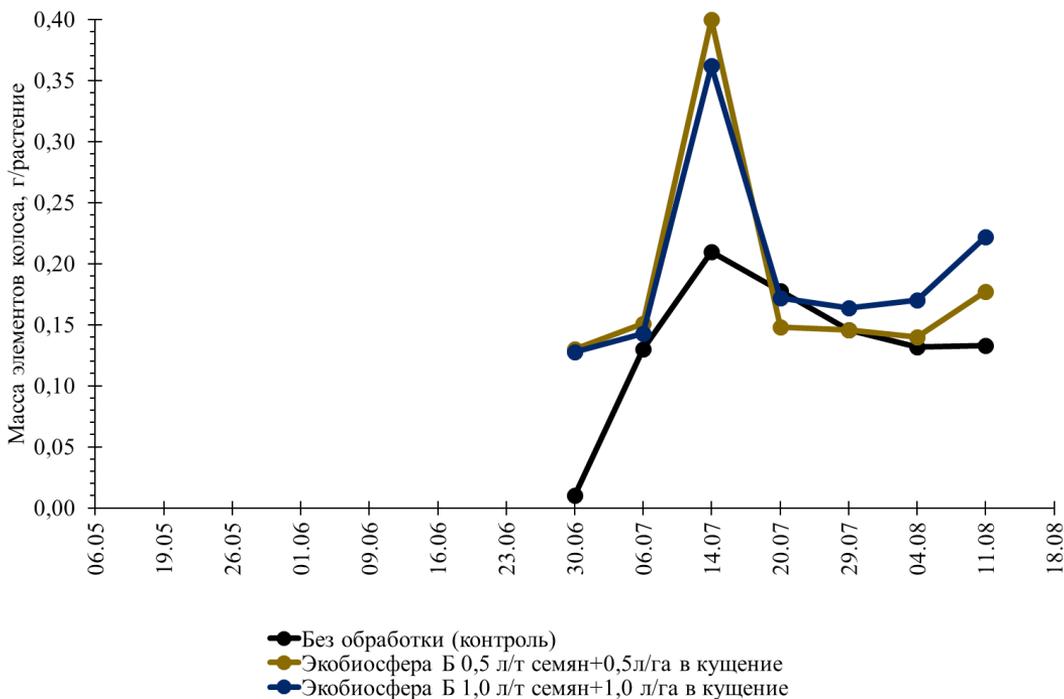


Рис. 5. Динамика массы элементов колоса (влажность 13%) *T. aestivum* L. Любава, 2023 г. (ориг.)

Таблица 9

**Система уравнений динамики коэффициента элементов колоса растений *T. aestivum* L. Любава**

Диапазон суммарной энтальпии воздуха, $C_p$ КДж/кг	Уравнение динамики коэффициента элементов колоса ( $K_g$ )	
	«Экобиосфера Б» 0,5 л/т семян + 0,5 л/га в кушение	«Экобиосфера Б» 1,0 л/т семян + 1,0 л/га в кушение
1716,27...2294,82	$K_g = 11,863 \cdot C_p^{-0,598}$	–
2294,83...2560,81	$K_g = 0,6502 \cdot \ln(C_p) - 4,8058$	–
2560,82...2963,02	$K_g = -0,883 \cdot \ln(C_p) + 7,0614$	–
2963,03...3259,12	$K_g = 0,0204 \cdot e^{0,0007 C_p}$	–
3259,13...3642,04	$K_g = 630,77 \cdot C_p^{-0,988}$	–
1716,27...2294,82	–	$K_g = 0,0218 \cdot e^{0,001 C_p}$
2294,83...2963,02	–	$K_g = -0,893 \cdot \ln(C_p) + 7,1334$
2963,03...3642,04	–	$K_g = 0,039 \cdot e^{0,0005 C_p}$
$R^2$	0,9797	0,8200

**Динамика массы плодов.** Максимальной массы зерновки *T. aestivum* L. достигли в фазу твердой спелости. В результате 2-кратного применения «Экобиосфера Б» масса этой основной части продукции пшеницы на 44,93% превышала таковую в контрольном варианте (рис. 6), а сравнительно с однократной обработкой семян [1] – на 53,85% в варианте Семена 0,5+K0,5 и на 17,65% в варианте Семена 1,0+K1,0.

Уравнение, описывающее динамику коэффициента плодов ( $K_p$ ) с точностью 93,01–94,18%, представлено в таблице 10.

Прогноз массы плодов *T. aestivum* L., рассчитанный по модели (3) соответствовал эмпирическим данным на 98,24 и 96,11% по вариантам Семена 0,5+K0,5 и Семена 1,0+K1,0 соответственно, что свидетельствует о высокой точности прогноза урожайности яровой *T. aestivum* L. сорта Любава минимум за 80–90 суток до начала уборочных работ (табл. 6).

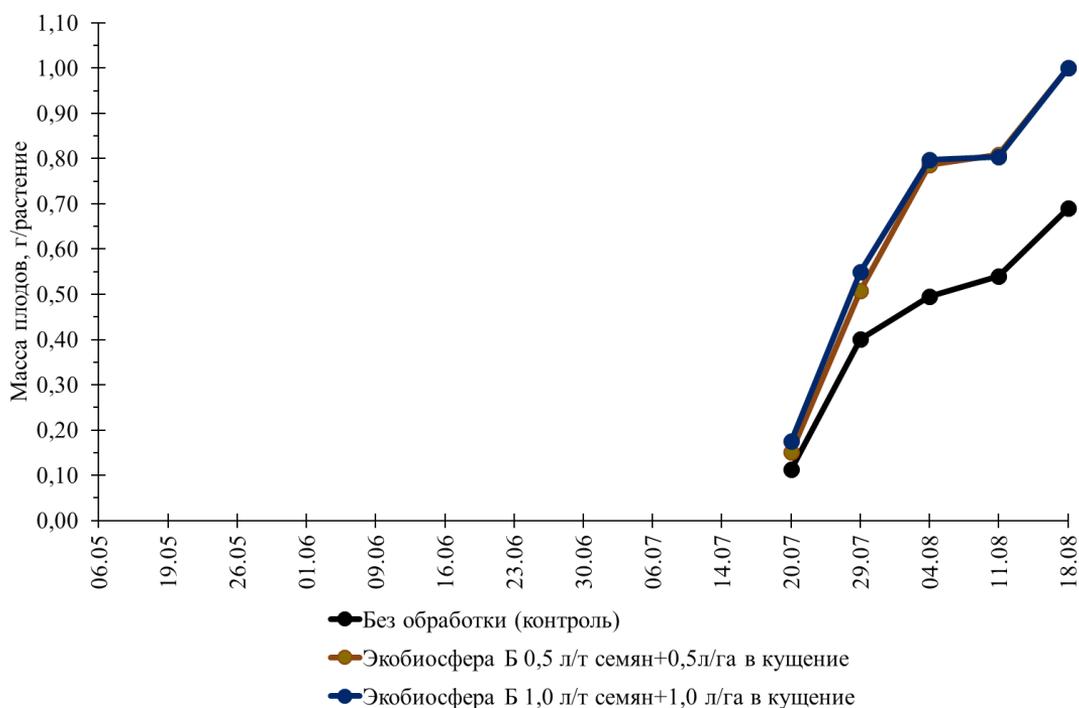


Рис. 6. Динамика массы плодов (влажность 13%) *T. aestivum* L. Любава, 2023 г. (ориг.)

Таблица 10

**Уравнение динамики коэффициента плодов растений *T. aestivum* L. Любава**

Диапазон суммарной энтальпии воздуха, $C_p$ КДж/кг	Уравнение динамики коэффициента плодов ( $K_p$ )	
	«Экобиосфера Б» 0,5 л/т семян + 0,5 л/га в кушение	«Экобиосфера Б» 1,0 л/т семян + 1,0 л/га в кушение
2560,82...4001,35	$K_p = 1,835 \cdot \ln(C_p) - 14,185$	$K_p = 1,7546 \cdot \ln(C_p) - 13,521$
$R^2$	0,9418	0,9301

## Выводы

В результате исследований установлено, что предпосевная обработка семян и растений в фазу кущения комплексом «Экобиосфера Б» способствовала ускорению прохождения фенологических фаз развития в середине периода вегетации *T. aestivum* L. сорта Любава на 7 суток по сравнению с контрольными (без обработки) растениями. Рассчитана теплоемкость фенологических фаз развития, обеспечивающая возможность прогнозирования календарных сроков фенологических фаз развития от даты посева до уборочной спелости на основании прогноза тепловых ресурсов текущего года.

Разработаны сезонные имитационно-динамические модели прогноза ростовых процессов *T. aestivum* L., скорректированные с учетом эффективности нормы расхода и кратности обработок растений гуминовым комплексом «Экобиосфера Б», работающие с точностью:

– «Экобиосфера Б» (0,5 л/т семян + 0,5 л/га в фазу кущения): высота растения – 98,32%, массы фитоорганов влажностью 13%: наземная активная фитомасса – 95,10%, листьев – 83,54%, стебля – 91,08%, элементов колоса – 87,23%, плодов – 98,24%.

– «Экобиосфера Б» (1,0 л/т семян + 1,0 л/га в фазу кущения): высота растения – 98,47%, массы фитоорганов влажностью 13%: наземная активная фитомасса – 87,5%, листьев – 64,57%, стебля – 85,46%, элементов колоса – 61,09%, плодов – 96,11%.

В производственных условиях модели обеспечат возможность прогнозировать продуктивность растений и урожайность *T. aestivum* L. Любава минимум за 80–90 суток до уборочной спелости.

## Библиографический список

1. Виноградова В.С., Бородий С.А., Макаров С.С. Ростовая модель прогноза продуктивности яровой пшеницы Любава на фоне предпосевной обработки семян препаратом «Экобиосфера Б» // *АгроЭкоИнфо*. – 2024. – № 2. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/2/st\\_207.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/2/st_207.pdf) (дата обращения: 15.04.2024).

2. Демьянова-Рой Г.Б., Панкратов Ю.В., Болнова С.В., Воробьев Е.С. Агрофизические свойства почвы и урожайность полевых культур при различных приемах ее обработки // *АгроЭкоИнфо*. – 2019. – № 3. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/3/st\\_338.doc](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/3/st_338.doc) (дата обращения: 24.12.2023).

3. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований): Учебник. – Изд. 6-е. – М.: Альянс, 2011. – 350 с.

4. Каюмов М.К. Программирование урожая сельскохозяйственных культур: Учебник. – М.: Агропромиздат, 1989. – 317 с.

5. Ещенко В.Е., Трифонова М.Ф., Копытко П.Г. и др. Основы опытного дела в растениеводстве: Учебное пособие / Под ред. В.Е. Ещенко, М.Ф. Трифоновой. – М.: КолосС, 2009. – 268 с.

6. Сорокин А.Н., Морозова Т.М. Эффективность предпосевного озонирования семян при выращивании яровой пшеницы // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. – 2019. – № 3 (59). – С. 126–132.

7. Бородий С.А., Виноградова В.С., Бородий П.С. Агроэкологическое обоснование технологии возделывания пижмы обыкновенной (*Tanacetum vulgare* L.) в Костромской области: Монография. – Караваево: Костромская ГСХА, 2019. – 156 с.

8. Бородий С.А., Бородий П.С. Прогноз фенологических стадий развития пижмы обыкновенной (*Tanacetum vulgare* L.) в дикорастущих ценопопуляциях // *Труды Костромской ГСХА*. – Кострома: КГСХА, 2017. – Вып. 86. – С. 5–11.

9. Бородий С.А., Виноградова В.С. Ростовая модель прогноза продуктивности яровой пшеницы Любава на фоне естественного плодородия почвы // Аграрный вестник Нечерноземья. – 2024. – № 1 (13). – С. 17–27.

10. Бородий С.А. Теоретическое обоснование комплексной имитационно-мониторинговой модели продукционного процесса растений в агроэкосистемах: Монография. – Кострома: Изд-во КГСХА, 2000. – 206 с.

## GROWTH MODEL FORECASTING THE PRODUCTIVITY OF *TRITICUM AESTIVUM* L. LUBAVA ON THE BACKGROUND OF PRE-SOWING SEED TREATMENT AND FOLIAR NUTRITION WITH THE PREPARATION ECOBIOSPHERE B

V.S. VINOGRADOVA<sup>1</sup>, S.A. BORODIY<sup>1</sup>, I.I. GOLOKTIONOV<sup>2</sup>, O.G. KARATAEVA<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Kostroma State Agricultural Academy;

<sup>2</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy)

*The article presents the results of the development of growth models forecasting the yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) Lubava based on the value of empirical sowing parameters obtained in the early stages of plant development, the predicted thermal resources of the growing season of the current year and the efficiency coefficients of the preparation Ecobiosphere B in the experimental field of the Kostroma State Agricultural Academy (Kostroma District, Kostroma Region). It was found that the humic complex Ecobiosphere B influenced the development of *T. aestivum* L. Lubava, shortening the interphase period in the middle of the growing season by seven days in comparison with the control (untreated) plants. The heat capacity of the phenological development phases was calculated, which made it possible to predict the calendar dates of the phenological development phases, from the sowing date to harvest maturity, based on the forecast of the heat resource for the current year. Simulation-dynamic growth models of seasonal prediction of phytometric parameters, adjusted to the efficiency of consumption rate and frequency of application of the humic complex Ecobiosphere B as a regulator of growth and development, worked with the following accuracy: 0.5 L/t seed + 0.5 L/ha in the tillering phase of Ecobiosphere B: plant height – 98.32%, mass of phytoorgans at 13% humidity: ground active phytomass – 95.1%, leaves – 83.54%, stem – 91.08%, ear elements – 87.23%, fruits – 98.24%; 1.0 L/t seed + 1.0 L/ha in the tillering phase of Ecobiosphere B: plant height – 98.47%, mass of phytoorgans at 13% humidity: ground active phytomass – 87.5%, leaves – 64.57%, stem – 85.46%, ear elements – 61.09%, fruits – 96.11%. The models will provide the ability to predict plant productivity and yield of *T. aestivum* L. The models will make it possible to predict plant productivity and yield of *T. aestivum* L. Lubava under production conditions at least 80–90 days before harvest maturity and, if necessary, to adjust the cultivation technology during the growing season in order to increase the economic efficiency of production.*

*Key words: spring wheat, *Triticum aestivum* L., variety, seeds, forecast, growth, phenological phases, mathematical simulation-dynamic model.*

### References

1. Vinogradova V.S., Borodiy S.A., Makarov S.S. Growth model forecasting the productivity of spring wheat Lybava on the background of pre-sowing seed treatment with Ecobiosphere B preparation. *AgroEkoInfo*. 2024;2. (In Russ.) URL: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/2/st\\_207.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/2/st_207.pdf) (accessed: April 15, 2024)

2. Demyanova-Roy G.B., Pankratov Yu.V., Bolnova S.V., Vorob'ev E.S. Agrophysical properties of soil and yield of field crops under various methods of its processing. *AgroEkoInfo*. 2019;3. (In Russ.) URL: [http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/3/st\\_338.doc](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/3/st_338.doc) (accessed: December 24, 2023)
3. Dospekhov B.A. *Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)*. Moscow, Russia: Alyans, 2011:350. (In Russ.)
4. Kayumov M.K. *Programming agricultural crop yields*. Moscow, USSR: Agropromizdat, 1989:317. (In Russ.)
5. Eshchenko V.E., Trifonova M.F., Kopytko P.G. et al. *Fundamentals of experimental work in crop production*. Eshchenko V.E., Trifonova M.F. (Eds.). Moscow, Russia: KolosS, 2009:268. (In Russ.)
6. Sorokin A.N., Morozova T.M. Efficiency of preseeding ozonization of seeds at cultivation of spring-sown field. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regionalnoe prilozhenie*. 2019;3:126–132. (In Russ.)
7. Borodiy S.A., Vinogradova V.S., Borodiy P.S. *Agroecological substantiation of the technology for cultivating tansy (Tanacetum vulgare L.) in the Kostroma Region: a monograph*. Karavaevo, Russia: Kostroma State Agricultural Academy, 2019:156. (In Russ.)
8. Borodiy S.A., Borodiy P.S. The forecast of phenological stages of development of *Tanacetum vulgare L.*. In: *Trudy Kostromskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. Kostroma, Russia: Kostroma State Agricultural Academy, 2017;86:5–11. (In Russ.)
9. Borodiy S.A., Vinogradova V.S. Growth model forecasting the productivity of spring wheat Lubava on the background of natural soil fertility. *Agrarian Bulletin of the Non-Chernozem Area*. 2024;1:17–27. (In Russ.) [https://doi.org/10.52025/2712-8679\\_2024\\_01\\_17](https://doi.org/10.52025/2712-8679_2024_01_17)
10. Borodiy S.A. *Theoretical substantiation of a complex simulation-monitoring model of the production process of plants in agroecosystems: a monograph*. Kostroma, Russia: Kostroma State Agricultural Academy, 2000:206. (In Russ.)

### Информация об авторах

**Виноградова Вера Сергеевна**, д-р с.-х. наук, профессор, профессор кафедры агрохимии, биологии и защиты растений, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение высшего образования «Костромская государственная сельскохозяйственная академия»; 156530, Российская Федерация, Костромская обл., Костромской р-н, пос. Караваяево, Учебный городок, 34; e-mail: [verochka\\_54@list.ru](mailto:verochka_54@list.ru); тел.: (4942) 629–130

**Бородий Сергей Анатольевич**, д-р с.-х. наук, профессор, профессор кафедры земледелия, растениеводства и селекции, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение высшего образования «Костромская государственная сельскохозяйственная академия»; 156530, Российская Федерация, Костромская обл., Костромской р-н, пос. Караваяево, Учебный городок, 34; e-mail: [borody.sergei@yandex.ru](mailto:borody.sergei@yandex.ru); тел.: (4942) 629–130

**Голоктионов Иван Иванович**, ассистент кафедры декоративного садоводства и газоноведения, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: [goloktionov.ivan@rgau-msha.ru](mailto:goloktionov.ivan@rgau-msha.ru); тел.: (499) 976–05–45

**Каратаева Оксана Григорьевна**, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры педагогики и психологии профессионального образования,

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева»; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: okarataeva@rgau-msha.ru; тел.: (499) 976–38–76

#### **Information about the authors:**

**Vera S. Vinogradova**, DSc (Ag), Professor, Professor at the Department of Agrochemistry, Biology and Plant Protection, Kostroma State Agricultural Academy (34 Uchebniy Cr., Karavaevo Vlg., Kostroma District, Kostroma Region, 156530, Russian Federation); phone: (4942) 62–91–30; e-mail: verochka\_54@list.ru

**Sergey A. Borodiy**, DSc (Ag), Professor, Professor at the Department of Agriculture, Plant Production and Selection, Kostroma State Agricultural Academy (34 Uchebniy Cr., Karavaevo Vlg., Kostroma District, Kostroma Region, 156530, Russian Federation); phone: (4942) 62–91–30; e-mail: borody.sergei@yandex.ru

**Ivan I. Goloktionov**, Assistant at the Department of Ornamental Horticulture and Lawn Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation); phone: (499) 976–05–45; e-mail: goloktionov.ivan@rgau-msha.ru

**Oksana G. Karataeva**, CSci (Econ), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Pedagogy and Psychology of Professional Education, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya str., Moscow, 127550, Russian Federation); phone: (499) 976–38–76; e-mail: okarataeva@rgau-msha.ru