

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-79-95>

УДК 551.509/3:631.554/.559

Учёт осенне-зимнего увлажнения почвы в динамико-статистической модели прогноза урожайности озимых культур

В.М. Лебедева, Т.А. Найдина

*Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной
метеорологии, г. Обнинск, Россия
v_lebedeva@mail.ru 20*

Представлены результаты совершенствования методов прогноза урожайности озимых культур: пшеницы и ржи – с учетом увлажнения в осенне-зимний период. В основе динамико-статистического метода прогноза лежит базовая длиннопериодная модель продукционного процесса растений «погода–урожай». Прогнозирование урожайности осуществляется с учетом двух составляющих временного ряда урожайности: тренда и отклонений от него – с помощью оценки агрометеорологических условий на основе динамической модели продукционного процесса растений. В динамическую модель озимых культур вводится поправочный коэффициент, учитывающий увлажнение в осенне-зимний период, что улучшает качество прогнозов средней по субъектам Российской Федерации урожайности озимой пшеницы и озимой ржи. Среднее значение относительной ошибки прогнозов за пять лет авторских испытаний с 2017 по 2021 г. составило 13 и 9 % в первый и второй сроки прогнозов соответственно.

Ключевые слова: динамико-статистический метод прогноза, урожайность, озимые, рожь, пшеница, фотосинтез, условия вегетации

Consideration of autumn-winter soil moisture in a dynamic-statistical model for winter crops yield forecasting

V.M. Lebedeva, T.A. Naidina

*All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology, Obninsk, Russia
v_lebedeva@mail.ru*

The results of improving methods for the yield prediction of two winter crops (wheat and rye) taking into account the autumn-winter period moisture content are presented. The dynamic-statistical forecast method is based on the “weather-harvest” base long-term model of the plant production process. The yield forecasting is carried out taking into account two components of the yield time series (a trend and deviations from it) by assessing agrometeorological conditions based on the dynamic model of the plant production process. The correction coefficient that takes into account the autumn-winter moisture content is introduced into the winter crops dynamic model, which improves the quality of winter wheat and winter rye average yield forecasts for the subjects of the Russian Federation. The average relative forecast error for five years of the author’s tests from 2017 to 2021 amounted to 13 and 9 % for the first and second forecast time moments, respectively.

Keywords: dynamic-statistical forecasting method, yield, winter crops, rye, wheat, photosynthesis, vegetation conditions

Введение

Агрометеорологические прогнозы урожайности и валового сбора озимых зерновых культур являются важным составляющим элементом системы агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства. Однако разработанные более полтора десятилетия назад методы прогноза урожайности озимых культур нуждались в существенной переработке, связанной с переходом официальной статистики к рядам урожайности с уборочной площади (а не с посевной, как было ранее), с внедрением в сельское хозяйство современных более продуктивных сортов и новых технологий возделывания. При этом расчет динамики формирования урожая в этих методах начинается во второй половине марта – апреле, с момента возобновления вегетации озимой пшеницы и ржи, без учета осадков осенне-зимнего периода. Исследования, проведенные нами, показали возможность и необходимость учета таких осадков, что сказалось на улучшении качества прогнозов.

В ФГБУ «ВНИИСХМ» в настоящее время завершаются работы по усовершенствованию динамико-статистических методов прогнозирования урожайности озимой ржи в среднем по субъектам Российской Федерации. За основу взяты методики прогнозов, разработанные в ФГБУ «ВНИИСХМ» Т.И. Русаковой [18] в 1999–2004 гг. и используемые в УГМС и ФГБУ «Гидрометцентра России» для оперативного обеспечения агропромышленного комплекса Российской Федерации.

Усовершенствование динамико-статистического метода

Метод прогноза разработан на основе динамической модели биопродуктивности сельскохозяйственных растений, где использованы методологические принципы моделирования воздействия погодных и почвенно-климатических условий на рост и развитие выращиваемых культур, разработанные группой специалистов ВНИИСХМ под руководством профессора А.Н. Полевого [15]. В основу базовой длиннопериодной модели продукционного процесса растений положена известная модель «погода–урожай», разработанная советскими и зарубежными специалистами в области агрометеорологии [1, 7, 17, 20–21, 26, 29–32].

Для решения задачи оперативного прогнозирования урожая в среднем по субъектам РФ в установленные Росгидрометом сроки структура модели была модифицирована с учетом реализации следующих условий [8]:

- количественного описания основных процессов биопродуктивности растений: дыхания, фотосинтеза, роста и распределения ассимилятов;
- учета влияния агрометеорологических факторов на формирование продуктивности посевов;
- учета географической изменчивости параметров динамической модели;

– возможности использования сокращенного объема входной информации с сохранением уровня детализации математического описания важнейших процессов жизнедеятельности растения.

Урожайность зерновых озимых культур зависит от уровня культуры земледелия, погодных и почвенно-климатических условий района возделывания. Предполагается, что ряды фактической урожайности Y_t разделены на две составляющие: детерминированную – $f(t)$, зависящую от культуры земледелия в конкретных почвенно-климатических условиях, и случайную – ε_t , определяющуюся погодными условиями конкретных лет [15]:

$$Y_t = f(t) + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где Y_t – временной ряд урожайности; $f(t)$ – тренд; ε_t – случайная составляющая временного ряда.

Для прогнозирования урожайности Y используется выражение [8]:

$$Y = 0,01 \cdot Y_{t+1} \cdot E, \quad (2)$$

где Y и Y_{t+1} – прогнозируемая урожайность и тенденция урожайности озимой ржи соответственно, ц/га; E – оценка степени отличия складывающихся (на дату составления прогноза) агрометеорологических условий формирования урожая от многолетних, на фоне которых формируется тенденция урожайности, %.

Прогнозирование урожайности выполняется с учетом вышеописанных составляющих временного ряда. Тренд $f(t)$ рассчитывается с использованием статистических методов экстраполяции по одному временному ряду (как среднее взвешенное, методом гармонических весов и др.), отклонение урожайности от сложившегося тренда – по динамической модели, посредством оценки агрометеорологических условий роста и развития сельскохозяйственных культур.

В модели описано «поведение» ряда наблюдаемых физиологических процессов: фотосинтеза, дыхания, роста и распределения ассимилятов в период вегетации культуры. Числовые параметры, входящие константами в формулы, биометрические параметры, являющиеся характеристиками, присущими определенной сельскохозяйственной культуре, установлены экспериментальным путем: динамика удельной поверхностной плотности листьев и стеблей, соотношение отдельных органов растений, сухой биомассы и площадь поверхности отдельных органов «среднего» растения на дату возобновления вегетации.

Функциональные параметры (суммы эффективных температур воздуха), характеризующие влияние изменения возраста органов растения на интенсивность фотосинтеза, роста, дыхания, устанавливаются для территории каждого субъекта на основании данных об агроклиматических условиях произрастания сельскохозяйственных культур. Суммы эффективных температур, устанавливающие точки перегиба, максимума

и минимума в функциональных зависимостях, вычисляются в зависимости от средних многолетних дат наступления основных фаз развития на территории субъекта.

В динамической модели установлены функциональные зависимости параметров модели от текущих погодных условий, определяемых следующими оперативными декадными данными: значениями температуры воздуха и количества осадков в весенне-летний период вегетации озимых культур. Функция воздействия температуры воздуха на фотосинтез представлена температурной кривой, а функция воздействия влажности почвы на фотосинтез заменена на функцию влияния осадков в связи с сокращенным объемом наблюдений за запасами продуктивной влаги в почве на сети гидрометеорологических станций.

Количественная оценка влияния агрометеорологических условий на формирование урожайности сельскохозяйственных культур рассчитывается как отношение биомассы репродуктивных органов, полученной по модели с использованием информации, характеризующей условия оцениваемого периода m_p , к биомассе репродуктивных органов, рассчитанной по модели по средним многолетним данным m :

$$E = \frac{m_p}{m} \cdot 100. \quad (3)$$

Численное значение оценки E позволяет количественно характеризовать агрометеорологические условия формирования урожая.

Усовершенствование действующих (ранее разработанных) методов прогноза урожайности, выполненное нами, заключалось в следующем:

1) анализ новых статистических рядов урожайности озимых культур, так как, согласно официальной статистики, в настоящее время используются ряды урожайности с уборочной площади вместо рядов урожайности с посевной площади;

2) подбор новой трендовой составляющей, учитывающей достигнутый уровень урожайности по каждому рассматриваемому субъекту РФ;

3) корректировка влажностных и температурных кривых динамико-статистической модели, чтобы для озимой пшеницы, например, сделать их менее чувствительными к осадкам и температуре воздуха, так как новые сорта пшеницы более жаростойкие и засухоустойчивые;

4) определение уточненных значений биомассы репродуктивных органов при средних многолетних агрометеорологических условиях;

5) корректировка начального значения «интенсивности фотосинтеза» в зависимости от условий увлажнения осеннего-зимнего периода.

Используемая нами в настоящее время динамическая модель продукционного процесса озимых культур не предусматривает учет влияния факторов внешней среды на процессы фотосинтеза, дыхания и роста в период осенней вегетации и условий перезимовки озимых. В то же время известно, что ресурсы влаги на начало вегетации озимых культур весной имеют большое, в ряде случаев решающее значение для формирования урожая

озимых [28]. В работе [24], например, для учета этих ресурсов в прогнозировании урожайности зерновых культур в Северо-Кавказском федеральном округе, где основные площади зерновых колосовых культур заняты озимой пшеницей, в регрессионной модели используется параметр, учитывающий влияние на урожайность осенне-зимних осадков. Для учета одного из самых важных факторов – режима увлажнения в этот период в методах прогнозов для большинства субъектов РФ была введена разработанная нами на основе данных наблюдений гидрометстанций Росгидромета поправка на количество осадков, выпавших в осенний и зимний периоды. Такой подход обусловлен тем, что блок модели, описывающий условия осенней вегетации и перезимовки озимых культур должен быть достаточно сложным, чтобы правильно описывать физиологические процессы растений [2–3, 6, 12–14, 16, 27], в то время как для обеспечения сельского хозяйства прогностической информацией в оперативном режиме в качестве входной информации используется только оперативная декадная агрометеорологическая информация [8, 18, 19].

Зависимость урожайности большинства культур от количества и времени выпадения осадков наиболее значима в районах недостаточного увлажнения. Запасы влаги в нижних горизонтах создаются благодаря осадкам, выпадающим в осенний и зимний периоды. При достаточном их количестве почва может увлажняться на глубину 150–200 см. В такие годы выпадение осадков в весенне-летний период вегетации создает благоприятные условия для получения высокого урожая зерна. При больших запасах продуктивной влаги в нижних горизонтах почвы и даже малом количестве осадков в период весенней вегетации озимой пшеницы может сформироваться неплохой урожай.

С другой стороны, озимые культуры за период вегетации расходуют значительно больше влаги, чем яровые, что связано с более продолжительным периодом вегетации и формированием более высокого урожая общей массы. На юге и юго-востоке страны нередки случаи, когда в первую половину осенней вегетации растения озимых культур испытывают существенный недостаток влаги, при этом задерживается образование листьев и побегов, слабо развивается корневая система, растения уходят в зиму недоразвитыми [4, 22–23, 25, 27].

В динамической модели учет влияния факторов внешней среды на скорость прохождения фотосинтеза осуществляется мультипликативным образом. Уравнение световой кривой фотосинтеза в реальных условиях среды рассчитывается по формуле [15]:

$$\Phi_{\tau}^j = \Phi_0^j \alpha_f^j \Psi^j \gamma^j, \quad (4)$$

где Φ_0^j – фотосинтез в биологически оптимальных условиях среды; Ψ^j и γ^j – функции влияния температуры воздуха и влажности почвы; α_f^j – «онтогенетическая кривая фотосинтеза» [15], которая рассчитывается по формуле:

$$\alpha_f^j = \alpha_{f_0} \left(\frac{\sum T}{\sum T_m} - 1 \right)^2 \quad (5)$$

где $\sum T$ – сумма эффективных температур нарастающим итогом; $\sum T_m$ – сумма эффективных температур, при которой могла бы наблюдаться максимальная «интенсивность фотосинтеза» листьев (посева); α_{f_0} – начальная «интенсивность фотосинтеза» по отношению к максимально возможной на начало вегетации при $\sum T = 0$.

Нами была усовершенствована методика прогноза урожайности озимой пшеницы для каждого субъекта: проведена замена исходных рядов урожайности озимой пшеницы с посевной площади на ряды урожайности с уборочной площади, подобран новый тренд, проведена корректировка температурной и влажностной кривых, определено новое значение биомассы репродуктивных органов при средних многолетних агрометеорологических условиях.

По новым методикам рассчитаны прогнозы урожайности и их оправдываемость за период с 2001 по 2011 год. Анализ ошибок прогнозов и данных о количестве осадков, выпавших за осенне-зимний период, показал, что для ряда субъектов, расположенных на юге и юго-востоке зоны возделывания озимых культур в Российской Федерации в отдельные годы можно понизить ошибки полученных прогностических значений урожайности за счет введения поправки к α_{f_0} , учитывающей увлажнение осенне-зимнего периода.

В табл. 1 показан пример учета режима увлажнения в осенне-зимний период для прогноза урожайности озимой пшеницы в Саратовской области. В результате анализа расчетов ожидаемой урожайности озимой пшеницы на основе динамико-статистического метода за период с 2001 по 2011 г. нами было установлено, что значение начальной «интенсивности фотосинтеза» на начало вегетации (в модели биопродуктивности пшеницы $\alpha_{f_0} = 0,5$) в тех случаях, когда выполнялось условие: осадки в осенний и зимний периоды выше нормы и при этом отклонение суммы эффективных температур от нормы в период вегетации не превышало 220 °С, необходимо повысить и принять равным 0,59.

Исследования показали, что за 11-летний период условия, соответствующие обозначенным критериям, наблюдались в 2001, 2002, 2004 и 2007 гг. (табл. 1). В 2009 г., напротив, наблюдался острый дефицит осадков в осенний и зимний периоды. В годы, когда общая сумма осадков за весь период и отдельно за осенний не превышает 75 %, оказалось целесообразным понизить значение «начальной интенсивности фотосинтеза» на начало вегетации до 0,47.

В период авторских испытаний метода (2012–2015 гг.) оказалось, что два года (2013 и 2014) соответствуют условиям, для которых значение «начальной интенсивности фотосинтеза» на начало вегетации было повышено, и один год (2015) – когда было понижено.

Таблица 1. Учет увлажнения осенне-зимнего периода при расчете ожидаемой урожайности озимой пшеницы в Саратовской области
Table 1. Taking into account moisture in the autumn-winter period when calculating the expected yield of winter wheat in the Saratov region

Год	Урожайность, ц/га			Сумма осадков, % от нормы			Отклонение суммы эффективных температур от нормы, °С	$\alpha_{6,}$ отн.ед.
	фактическая	прогнозируемая		сентябрь-ноябрь	декабрь-март	сентябрь-март		
		без учета осенне-зимних осадков	с учетом					
2001	21,2	12,8	21,0	100,0	113,8	106,4	109,0	0,59
2002	22,0	16,7	20,6	137,1	115,2	125,8	-31,0	0,59
2003	12,6	15,7	15,7	151,0	81,0	114,8	-36,0	0,50
2004	21,5	18,0	21,0	120,4	116,8	118,5	-37,0	0,59
2005	16,5	14,6	14,6	134,6	95,7	114,5	58,0	0,50
2006	18,6	18,2	18,2	59,1	104,2	82,5	-22,0	0,50
2007	20,3	18,6	22,3	100,2	122,4	111,7	-58,0	0,59
2008	19,1	18,5	18,5	109,6	94,2	101,7	62,0	0,50
2009	16,9	18,3	16,2	70,8	74,1	72,5	-47,0	0,47
2010	9,3	10,1	10,1	59,0	160,3	111,4	84,0	0,50
2011	9,2	5,9	8,4	129,8	110,9	120,0	-9,0	0,59
Авторские испытания								
2012	12,8	12,2	12,2	133,0	129,2	137,1	222,0	0,50
2013	20,0	16,7	20,0	105,0	108,5	101,3	112,0	0,59
2014	22,0	15,0	21,2	122,3	100,4	145,7	41,0	0,59
2015	15,5	17,7	15,7	63,1	88,2	36,1	-14,0	0,47
Производственные испытания								
2016	28,4	25,3	31,5	135,2	145,8	140,6	78,8	0,59
2017	35,1	31,5	31,5	145,4	89,9	116,7	-119,0	0,50
2018	20,4	17,3	22,6	110,0	130,9	120,8	8,3	0,59
Использование метода в оперативной работе								
2019	17,1	18,6	18,6	61,4	160,3	112,6	161,8	0,50
2020	29,9	25,9	25,9	41,4	110,8	77,3	-7,5	0,50
2021	17,3	22,2	22,2	39,9	121,1	81,9	168,8	0,50

Во всех трех случаях внесение поправки привело к уменьшению ошибки прогноза урожайности озимой пшеницы. Результаты производственных испытаний (2016–2018 гг.) и применение метода в оперативной работе также подтверждают целесообразность используемого подхода.

Метод прогноза урожайности озимой пшеницы по 44 субъектам РФ успешно прошел производственные испытания и рекомендован к практическому использованию в качестве основного метода в ФГБУ «Гидрометцентр России» и подразделениях Росгидромета [5].

В настоящее время проводятся работы по разработке усовершенствованного метода прогноза урожайности озимой ржи для 44 субъектов РФ с использованием аналогичного подхода.

Усовершенствованный метод прогноза урожайности озимой ржи в 2020–2022 гг. был разработан для 44 субъектов РФ, в которых площадь посевов ржи наибольшая. Для каждого из этих субъектов за период с 2001 по 2015 год был проведен анализ оправдываемости прогнозов урожайности озимой ржи по разработанному усовершенствованному методу. В ряде субъектов, расположенных преимущественно в южной и юго-восточной зоне возделывания озимой ржи, ошибки полученных прогностических значений урожайности в отдельные годы существенно понизились за счет введения поправки к α_{f_0} , учитывающей количество осадков, выпавших в осенний и зимний периоды.

Учет режима увлажнения в осенне-зимний период показан на примере расчета ожидаемой урожайности озимой ржи в Белгородской области (табл. 2). В результате проведенных численных экспериментов и анализа расчетов ожидаемой урожайности на основе динамико-статистического метода за период с 2001 по 2015 г. было установлено, что значение начальной интенсивности фотосинтеза на начало вегетации (в модели $\alpha_{f_0} = 0,55$) необходимо увеличить на 7 % и принять равным 0,59 в тех случаях, когда выполнялось условие: сумма осадков в осенний период на 20 % выше нормы и за весь осенне-зимний период сумма осадков выше нормы. За 14-летний период условия, соответствующие обозначенным критериям, наблюдались в 2002, 2003, 2005, 2007, 2011, 2013 и 2014 гг. (табл. 2).

При недостатке влаги осенью, напротив, всходы бывают изреженными, рожь уходит в зиму слабо раскустившейся [25, 27]. В 2015 г. наблюдался острый дефицит осадков в осенний период, который не был восполнен за зимний период. В годы, когда сумма осадков осеннего периода была на 40 % ниже среднееголетнего значения и в целом за период с сентября по март она не превысила 95 % от нормы, а отклонение суммы эффективных температур от нормы за весенне-летний период вегетации было положительным, оказалось необходимым понизить значение начальной интенсивности фотосинтеза на начало вегетации на 7 % и принять равным 0,51. За период с 2001 по 2015 г. условия, соответствующие недостатку осенних осадков, наблюдались в 2012 и 2015 гг. (табл. 2).

Таблица 2. Учет увлажнения осенне-зимнего периода при расчете ожидаемой урожайности озимой ржи в Белгородской области
Table 2. Taking into account moisture in the autumn-winter period when calculating the expected yield of winter rye in the Belgorod region

Год	Урожайность, ц/га			Сумма осадков, % от нормы		Отклонение суммы эффективных температур от нормы, °С	α_{fo} , отн.ед.	
	фактическая	прогнозируемая		сентябрь-ноябрь	сентябрь-март			
		без учета	с учетом					
			осенне-зимних осадков					
2001	21,9	22,9	22,9	100,0	100,5	-86	0,55	
2002	25,3	17,2	20,8	128,5	120,4	-56	0,59	
2003	19,1	14,6	18,0	146,3	104,1	-74	0,59	
2004	22,6	19,6	19,6	94,7	133,4	-185	0,55	
2005	21,3	25,9	26,4	136,1	131,8	22	0,59	
2006	19,2	23,3	23,3	96,5	122,9	-75	0,55	
2007	18,2	15,9	19,1	132,8	110,1	21	0,59	
2008	23,5	21,0	24,9	172,9	125,1	-42	0,59	
2009	19,7	21,8	21,8	86,7	107,3	-69	0,55	
2010	12,6	14,1	14,1	99,0	123,2	76	0,55	
2011	21,6	18,9	22,9	152,2	127,6	43	0,59	
2012	19,2	21,7	17,0	45,9	82,9	210	0,51	
2013	25,8	21,4	25,7	126,6	127,8	177	0,59	
2014	32,8	20,7	25,2	153,9	106,2	75	0,59	
2015	20,7	24,3	20,3	33,2	73,0	15	0,51	
Авторские испытания								
2016	35,0	31,6	31,6	89,2	125,8	3	0,55	
2017	37,1	33,4	33,4	108,6	104,6	-118	0,55	
2018	37,5	32,7	34,1	124,3	153,2	68	0,59	
2019	28,1	34,7	29,9	55,4	90,6	135	0,51	
2020	32,1	30,2	30,2	88,5	95,8	-63	0,55	
2021	28,6	32,7	32,7	66,2	95,8	-54	0,55	

На рис. 1–3 показано влияние введенной нами поправки на динамику функции «онтогенетическая кривая» фотосинтеза, площади листовой поверхности растения и накопления биомассы колоса в динамической модели продукционного процесса озимой ржи. В 2014 г. поправка введена в связи с хорошим влагообеспечением осенне-зимнего периода, α_{f_0} была увеличена на 0,04 и составила 0,59. В 2015 году в связи с дефицитом осадков осеннего и зимнего периодов α_{f_0} была уменьшена на 0,04 и составила 0,51 (рис. 1). В 2014 г. фактическая урожайность озимой ржи в Белгородской области по данным РОССТАТ составила 32,8 ц/га, в 2015 г. – 20,7 ц/га. На рис. 2 показано влияние введения поправки на расчет листового индекса в динамической модели: значение листового индекса после введения поправки увеличилось в 2014 г. и уменьшилось в 2015 г., что хорошо отразилось и на динамике накопления биомассы колоса (рис. 3).

В период авторских испытаний (2016–2021 гг.) оказалось, что два года также соответствуют введенным нами условиям (табл. 1): значение начальной интенсивности фотосинтеза в 2018 г. было на 7 % повышено, а в 2019 г. – понижено. При этом введение поправки способствовало уменьшению ошибки прогноза ожидаемой урожайности зерна озимой ржи на 8,5 % в 2018 г. и на 19,2 % в 2019 году (табл. 1).

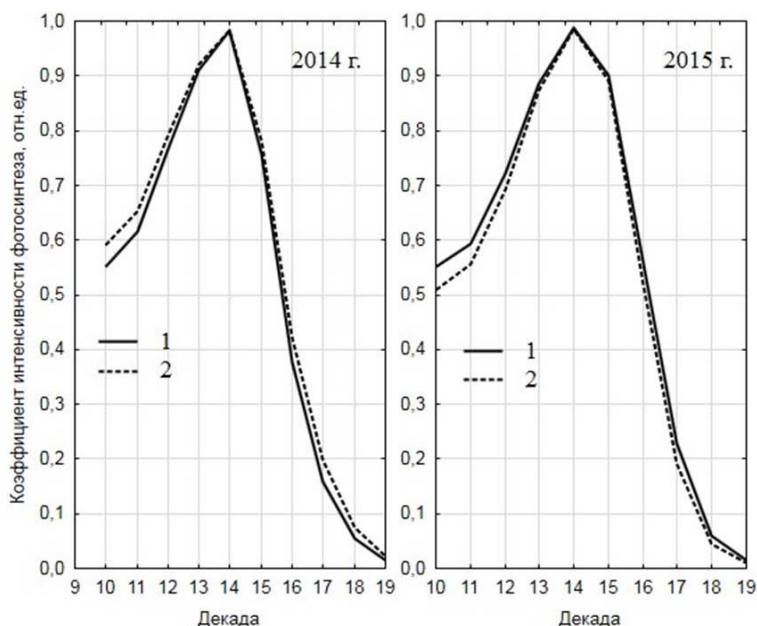


Рис. 1. «Онтогенетическая кривая» фотосинтеза α_f : 1 – при начальном значении интенсивности фотосинтеза $\alpha_{f_0} = 0,55$; 2 – с корректировкой α_{f_0} в Белгородской области.

Fig. 1. “Ontogenetic curve” of photosynthesis α_f : 1 – at the initial value of photosynthesis intensity $\alpha_{f_0} = 0,55$; 2 – with adjustment in the Belgorod region.

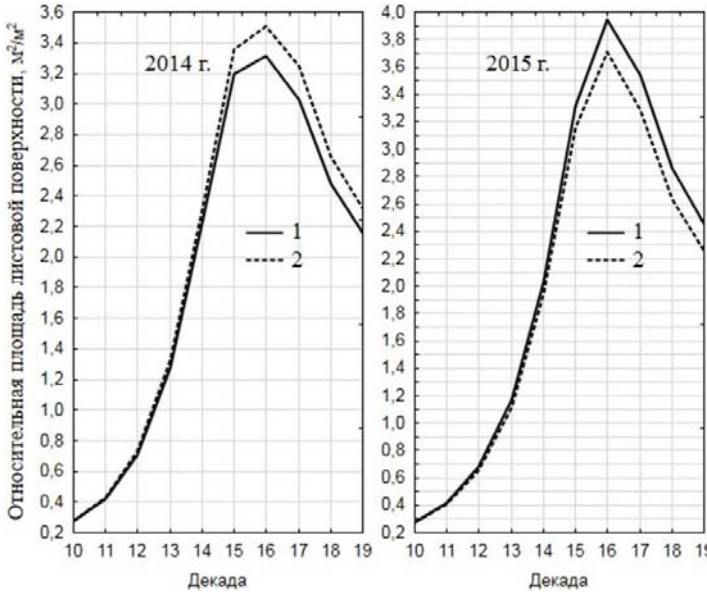


Рис. 2. Относительная площадь листовой поверхности растения при расчете урожайности в Белгородской области: 1 – без введения поправки, 2 – с поправкой.

Fig. 2. Leaf area index in the period of yield calculating in the Belgorod region: 1 – without correction, 2 – with correction.

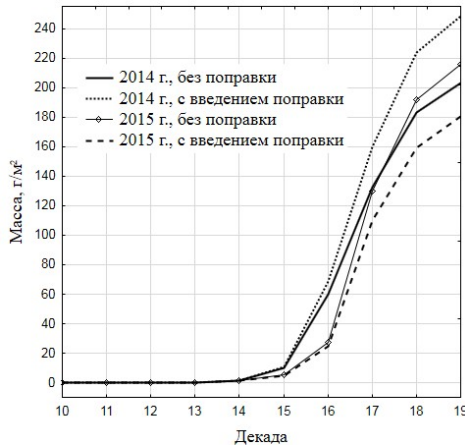


Рис. 3. Динамика накопления биомассы колоса в 2014 и 2015 гг.

Fig. 3. Dynamics of ear biomass accumulation in 2014 and 2015.

При разработке методик прогноза урожайности озимой ржи нами был использован аналогичный подход к усовершенствованию динамико-статистического метода. В табл. 3 приведены осредненные значения оправдываемости

прогнозов по относительной ошибке испытываемого метода, рассчитанные в соответствии с [11] (100 % минус относительная ошибка) в период авторских испытаний с 2017 по 2021 год. Для сравнения в таблице представлены также аналогичные характеристики качества действующего метода, инерционного и климатологического прогнозов.

Таблица 3. Среднее значение оправдываемости прогнозов урожайности озимой ржи по относительной ошибке (%) за период авторских испытаний с 2017 по 2021 год.

Table 3. Average accuracy value (%) of winter rye yield forecasts by relative error for the period of author's tests from 2017 to 2021

Субъект РФ		Оправдываемость прогноза урожайности, %					
		испытываемого		действующего		инерцион-ного	климато-логиче-ского
№	Наименование	21 мая	21 июня	21 мая	21 июня		
УГМС Центрально-Черноземных областей							
1	Белгородская область	88,7	90,8	73,5	68,8	87,1	83,4
2	Брянская область	89,8	95,6	49,3	45,0	89,9	78,0
3	Воронежская область	94,8	95,1	77,4	78,6	73,6	79,8
4	Курская область	95,1	96,6	59,7	61,3	79,7	83,4
5	Липецкая область	84,0	83,1	72,3	65,8	73,3	75,5
6	Орловская область	93,2	93,7	78,1	77,4	78,0	82,3
7	Тамбовская область	91,5	92,5	74,3	78,0	67,7	77,1
Центральное УГМС							
8	Владимирская область	91,7	89,7	79,9	83,8	67,5	82,3
9	Ивановская область	76,8	91,4	54,8	62,1	78,8	70,0
10	Калужская область	88,4	83,8	83,7	82,6	78,4	84,2
11	Московская область	90,5	91,0	73,6	83,9	78,3	76,7
12	Рязанская область	93,5	95,1	93,7	88,6	86,0	83,3
13	Смоленская область	93,5	95,1	88,9	90,2	86,0	83,3
14	Тверская область	88,3	89,2	69,5	69,3	55,0	71,6
15	Тульская область	91,4	94,7	70,8	80,4	64,8	80,6
Северное УГМС							
16	Вологодская область	84,4	91,4	69,4	78,0	78,5	78,1
Северо-Западное УГМС							
17	Калининградская область	80,1	86,1	68,4	70,2	65,4	69,9
Северо-Кавказское УГМС							
18	Волгоградская область	86,7	91,2	83,1	81,3	75,1	80,9
19	Ростовская область	90,1	90	82,7	82,6	88,4	84,2
Башкирское УГМС							
20	Республика Башкортостан	88,5	90	66,7	73,2	82,8	82,0
Верхне-Волжское УГМС							
21	Республика Марий Эл	80,6	90,8	79,7	82,4	63,9	81,2

Субъект РФ		Оправдываемость прогноза урожайности, %					
		испытываемого		действующего		инерцион-ного	климато-логиче-ского
№	Наименование	21 мая	21 июня	21 мая	21 июня		
22	Республика Мордовия	87	94,4	88,2	89,3	68,1	76,2
23	Удмуртская Республика	92,2	93,1	92,0	89,7	88,1	86,2
24	Чувашская Республика	93,6	92,9	83,8	81,2	76,4	72,4
25	Кировская область	81,2	94,5	84,0	87,0	70,6	82,8
26	Нижегородская область	90,2	89,2	86,3	86,5	72,1	81,1
УГМС Республики Татарстан							
27	Республика Татарстан	84,6	85,6	76,5	78,1	70,9	75,0
Приволжское УГМС							
28	Оренбургская область	67	89,9	59,2	71,5	44,6	56,8
29	Пензенская область	91	90,9	80,6	78,6	79,0	84,0
30	Самарская область	86,8	92,6	72,9	74,1	64,9	75,7
31	Саратовская область	81,2	90,2	80,3	86,8	66,6	75,1
32	Ульяновская область	90,2	92,0	82,4	81,5	72,6	83,2
Уральское УГМС							
33	Пермский край	85,5	92,9	80,3	80,5	80,1	88,2
34	Курганская область	91,4	88,3	83,4	83,2	63,7	69,2
35	Свердловская область	80,8	88,9	83,3	83,2	65,4	80,4
36	Челябинская область	69,3	88,5	66,1	66,7	68,0	52,0
Обь-Иртышское УГМС							
37	Тюменская область	82,5	82,0	62,0	61,2	64,3	73,6
38	Омская область	73,3	85,2	62,0	70,9	64,2	63,3
Западно-Сибирское УГМС							
39	Алтайский край	90,9	93,6	76,3	78,5	74,5	80,9
40	Кемеровская область	94,1	94,1	82,7	84,4	94,6	90,6
41	Новосибирская область	88,7	88,0	85,0	87,2	81,0	84,3
42	Томская область	86,7	93,4	85,5	83,5	90,2	84,1
Среднесибирское УГМС							
43	Красноярский край	91,5	93,8	90,0	91,4	91,1	87,6
Иркутское УГМС							
44	Иркутская область	85,3	92,4	82,4	79,2	85,1	87,6
Среднее		87,0	91,0	76,9	78,1	74,9	78,6

Средняя оправдываемость по относительной ошибке по 44 субъектам РФ за пять лет авторских испытаний с 2017 по 2021 г. составила 87 и 91 % в первый и второй сроки прогнозов соответственно, что превышает оправдываемость по действующему, инерционному и климатологическому методам.

Заключение

В результате проведенных нами исследований влияния условий увлажнения осенне-зимнего периода на урожайность озимых культур в работе выполнено усовершенствование динамической модели продукционного процесса озимой пшеницы и озимой ржи. Для этих целей использовался поправочный коэффициент к значению начальной интенсивности фотосинтеза по отношению к максимально возможной, используемый в базовой модели. Это позволило разработать новые методики прогноза урожайности рассматриваемых культур с учетом увлажнения осенне-зимнего периода.

Усовершенствованный метод прогноза урожайности озимой пшеницы, разработанный в ФГБУ «ВНИИСХМ» в 2014–2016 гг., успешно прошел производственные испытания и Решением ЦМКП от 18 сентября 2020 г. был рекомендован к практическому использованию в качестве основного метода в ФГБУ «Гидрометцентр России» и подразделениях Росгидромета. Оправдываемость по этому методу приведена в работе [5].

Среднее за пять лет авторских испытаний значение оправдываемости методики прогнозов урожайности озимой ржи по относительной ошибке составило 87 и 91 % в первый и второй сроки прогнозов соответственно.

Для разработки программ расчета прогноза использовалась среда Lazarus (язык программирования Free Pascal) до 2020 года, динамико-статистическая модель была реализована на языке Fortran.

В дальнейшем планируется автоматизация разработанных методов прогноза ожидаемой урожайности озимой ржи в информационно-прогностической системе оперативного агрометеорологического обеспечения аграрного сектора экономики России [18–19] и автоматизированной системе «АРМ-Агропрогноз» [9–10], а также проведение производственных испытаний представленных методов.

Список литературы

1. Абашина Е.В., Абашина Е.В., Просвиркина А.Г., Сиротенко О.Д. Упрощенная динамическая модель формирования урожая ярового ячменя // Труды ИЭМ. 1977. Вып. 8 (67). С. 54-68.
2. Антоненко В.С. Моделирование влияния агрометеорологических условий на процесс закаливания и перезимовку озимой пшеницы // Український гідрометеорологічний журнал. 2006. № 1. С. 95-103.
3. Антоненко В.С. Моделирование осенней вегетации озимой пшеницы // Вісник ОДЕКУ. 2009. Вып. 8. С. 133-139.
4. Вильфанд Р.М., Страшина А.И., Береза О.В. О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 45-78.
5. Лебедева В.М., Береза О.В. Результаты испытания автоматизированной технологии составления оценок условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы по субъектам Российской Федерации // Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей, методов гидрометеорологических прогнозов». 2021. Информационный сборник № 48. С. 103-114.
6. Долгий-Трач В.А., Федорова А.И. Моделирование процессов роста и развития озимой пшеницы в осенний период // Труды ВНИИСХМ. 1990. Вып. 26. С. 59-69.
7. Долгий-Трач В.А. Использование модели «Погода-урожай-3» для расчета урожая озимой пшеницы // Труды ВНИИСМ. 1986. Вып.21. С. 54-66.

8. Лебедева В.М., Страшная А.И. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 216 с.

9. Лебедева В.М., Калашиников Д.А., Найдина Т.А., Шкляева Н.М., Знаменская Я.Ю. Автоматизированная система «АРМ-Агропрогноз» для агрометеорологического обеспечения АПК, адаптированная для Центрального УГМС // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 92-102.

10. Лебедева В.М., Калашиников Д.А., Найдина Т.А., Шкляева Н.М., Знаменская Я.Ю. Автоматизированная система агрометеорологического обеспечения потребителей АПК на региональном уровне // Научно-практическая конференция по проблемам гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири: Тезисы докладов. Новосибирск, электронное издание, 2021. С. 19.

11. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. М.: Госкомгидромет, 1991. С. 98-107.

12. Моисейчик В.А. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 294 с.

13. Найдина Т.А. Развитие динамико-статистического метода оперативного прогнозирования урожайности озимой ржи // Гидрометеорология и образование. 2020. № 4. С. 51-64.

14. Полевой А.Н., Блыщик Д.В., Феоктистов П.А. Моделирование формирования зимостойкости растениями озимой пшеницы // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2015. Том 26. № 1. С. 28-48.

15. Полевой А.Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 320 с.

16. Полевой А. Н., Синицына В.В. Моделирование развития зерновых культур на ранних этапах онтогенеза и формирования всходов // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2013. Т. 25. С. 265-288.

17. Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэкосистемы. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 312 с.

18. Русакова Т.И. О создании новой технологии оперативного агрометеорологического обеспечения агропромышленного комплекса России // Метеорология и гидрология. 2004. № 12. С. 82-89.

19. Русакова Т.И., Лебедева В.М., Грингоф И.Г. Разработка и реализация новой информационно-прогностической системы оперативного агрометеорологического обеспечения аграрного сектора экономики России // Труды ВНИИСХМ. 2007. Вып. 36. С. 92-105.

20. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплого режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 168 с.

21. Сиротенко О.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 1. Математические модели в агрометеорологии / Под ред. А.Д. Клещенко и И.Г. Грингофа. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 136 с.

22. Страшная А.И. Использование показателей увлажнения для оценки засушливости и прогноза урожайности зерновых культур в Поволжском экономическом районе // Труды Гидрометцентра России. 1993. Вып. 327. С. 15-22.

23. Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В. О сроках сева озимых культур в условиях изменения климата и их прогнозирование в Приволжском федеральном округе // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 345. С. 175-193.

24. Страшная А.И., Тибуев Х.Х. О прогнозировании урожайности зерновых и зернобобовых культур с большой заблаговременностью // Метеорология и гидрология. 1994. № 3. С. 91-95.

25. Тиунов А.Н., Глухих К.А., Хорькова О.А. Озимая рожь. М.: Колос, 1969. 392 с.

26. Тооминг Х.Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 264 с.

27. Туманов И.И. Физиология закаливания и морозостойкость растений. М.: Наука, 1978. 350 с.

28. Уланова Е.С. Агрометеорологические условия и урожайность озимой пшеницы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 302 с.

29. Baker C.H., Horrocks R.D. CORNMOD, a dynamic simulator of corn production // *Agric. Syst.* 1976. Vol. 1, no. 1. P. 57-77.
30. Bannayan M., Crout N.M.J., Hoogenboom G. Application of the CERES-Wheat model for within-season prediction of winter wheat yield in the united kingdom // *Agronomy journal.* 2003. Vol. 95. P. 114-125.
31. Poluektov R.A. et al. AGROTOOL – a system for crop simulation // *Archive of Agronomy and Soil Sciences.* 2002. Vol. 48. P. 609-636.
32. Rickman RW, Ramig RE, Allmaras RR. Modeling dry matter accumulation in dry land winter wheat // *Agronomy journal.* 1975. Vol. 67. P. 283-289.

References

1. Abashina, E.V., Abashina E.V., Prosvirkina A.G., Sirotenko O.D. Uproshchennaya dinamicheskaya model' formirovaniya urozhaya yarovogo yachmenya. *Trudy IEM*, 1977, vol. 67, no. 8, pp. 54-68 [in Russ.].
2. Antonenko V. S. Modelirovanie vliyaniya agrometeorologicheskikh uslovii na protsess zakalivaniya i perezimovku ozimoi pshenitsy. *Ukrains'kii gidrometeorologichnii zhurnal*, 2006, no. 1, pp. 95-103 [in Russ.].
3. Antonenko V.S. Modelirovanie osennei vegetatsii ozimoi pshenitsy. *Visnik ODEKU*, 2009, no. 8, pp. 133-139 [in Russ.].
4. Vil'fand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V. About the dynamics of the agroclimatic indicators of conditions of sowing, wintering and formation of the yield of the main grain crops. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 45-78 [in Russ.].
5. Lebedeva V.M., Bereza O.V. Rezul'taty ispytaniya avtomatizirovannoj tekhnologii sostavleniya oce-nok uslovij vegetatsii i prognoza urozhajnosti ozimoi pshenicy po sub"ektam Rossijskoj Federacii. *Rezul'taty ispytaniy novyh i usovershenstvovannyh tekhnologij, modelej, metodov gidrometeorologicheskikh prognozov.* 2021, Informacionnyj sbornik no. 48, pp. 103-114 [in Russ.].
6. Dolgii-Trach V.A., Fedorova A.I. Modelirovanie protsessov rosta i razvitiya ozimoi pshenitsy v osennii period. *Trudy VNIISKHM*, 1990, no. 26, pp. 59-69 [in Russ.].
7. Dolgii-Trach V.A. Ispol'zovanie modeli «Pogoda-urozhai-3» dlya rascheta urozhayev ozimoi pshenitsy. *Trudy VNIISKHM*, 1986, no. 21, pp. 54-66 [in Russ.].
8. Lebedeva V.M., Strashnaya A.I. Osnovy sel'skokhozyaistvennoi meteorologii. Tom II. Metody rasche-tov i prognozov v agrometeorologii. Kniga 2. Operativnoe agrometeorologicheskoe prognozirovanie. Obninsk: VNIIGMI-MTSD Publ., 2012, 216 p. [in Russ.].
9. Lebedeva V.M., Kalashnikov D.A., Naydina T.A., Shklyaeva N.M., Znamenskaya Y.Yu. ARM-Agroprognoz automated system for agrometeorological support of agricultural consumers adapted for the Central Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. *Gidrometeorologicheskije issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 377, no. 3, pp. 92-102 [in Russ.].
10. Lebedeva V.M., Kalashnikov D.A., Naidina T.A., Shklyaeva N.M., Znamenskaya Ya.Yu. Avtomatizirovannaya sistema agrometeorologicheskogo obespecheniya potrebitelei APK na regional'nom urovne. Nauchno-prakticheskaya konferentsiya po problemam gidrometeorologicheskikh prognozov, ekologii, klimata Sibiri: Te-zisy dokladov. Novosibirsk, elektronnoe izdanie, 2021, 19 p. [in Russ.].
11. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu proizvodstvennykh (operativnykh) ispytaniy novykh i uso-vershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov. Moscow: Goskomgidromet Publ., 1991, pp. 98-107 [in Russ.].
12. Moiseichik V.A. Agrometeorologicheskije usloviya i perezimovka ozimyykh kul'tur / V.A. Moiseichik. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 294 p. [in Russ.].
13. Naidina T.A. Razvitie dinamiko-statisticheskogo metoda operativnogo prognozirovaniya urozhaino-sti ozimoi rzhii. *Gidrometeorologiya i obrazovanie*, 2020, no. 4, pp. 51-64 [in Russ.].
14. Polevoi A.N., Blyshchik D.V., Feoktistov P.A. Modelirovanie formirovaniya zim-ostoikosti rasteni-yami ozimoi pshenitsy. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem [Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling]*, 2015, vol. 26, no. 1, pp. 28-48 [in Russ.].
15. Polevoi A.N. Prikladnoe modelirovanie i prognozirovanie produktivnosti posevov / A.N. Polevoi, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, 320 p. [in Russ.].

16. Polevoi A. N., Sinitsyna V.V. Modelirovanie razvitiya zernovykh kul'tur na rannikh etapakh ontoge-neza i formirovaniya vskhodov // *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling], 2013, vol. 25, pp. 265-288 [in Russ.].
17. Poluektov R.A. Dinamicheskie modeli agroekosistemy. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 312 p. [in Russ.].
18. Rusakova T.I. O sozdanii novoi tekhnologii operativnogo agrometeorologicheskogo obespecheniya ag-ropromyshlennogo kompleksa Rossii. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2004, no. 12, pp. 82-89 [in Russ.].
19. Rusakova T.I., Lebedeva V.M., Gringof I.G. Razrabotka i realizatsiya novoi informatsionno-prognosticheskoi sistemy operativnogo agrometeorologicheskogo obespecheniya agrarnogo sektora ekonomiki Rossii. *Trudy VNIISKHM*, 2007, no. 36, pp. 92-105 [in Russ.].
20. Sirotenko O.D. Matematicheskoe modelirovanie vodno-teplovogo rezhima i produktivnosti agro-ekosistem. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1981, 168 p. [in Russ.].
21. Sirotenko O.D. Osnovy sel'skokhozyaistvennoi meteorologii. Tom II. Metody raschetov i prognozov v agrometeorologii. Kniga 1. Matematicheskie modeli v agrometeorologii /pod red. A.D. Kleshchenko i I.G. Gringofa. Obninsk, FGBU VNIIGMI-MTSD Publ., 2012, 136 p. [in Russ.].
22. Strashnaya A.I. Ispol'zovanie pokazatelej uvlazhneniya dlya ocenki zasushlivosti i prognoza urozhajnosti zernovykh kul'tur v Povolzhskom ekonomicheskom rajone. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 1993, vol. 327, pp. 15-22 [in Russ.].
23. Strashnaya A.I., Maksimenkova T.A., Chub O.V. Terms of sowing of winter crops in the climate change conditions and their forecasting in Privolzhsky federal district. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2011, vol. 345, pp. 175-193 [in Russ.].
24. Strashnaya A.I., Tibuev H.H. O prognozirovanii urozhajnosti zernovykh i zernobobovykh kul'tur s bol'shoj zablagovremennost'yu. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 1994, no. 3, pp. 91-95 [in Russ.].
25. Tiunov A.N., Glukhikh K.A., Khor'kova O.A. Ozimaya rozh'. Moscow, Kolos Publ., 1969, 392 p. [in Russ.].
26. Tooming Kh.G. Ekologicheskie printsipy maksimal'noi produktivnosti posevov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984, 264 p. [in Russ.].
27. Tumanov I.I. Fiziologiya zakalivaniya i morozostoikost' rastenii. Moscow, Nauka Publ., 1978, 350 p. [in Russ.].
28. Ulanova E.S. Agrometeorologicheskie usloviya i urozhajnost' ozimoy pshenicy. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 302 p. [in Russ.].
29. Baker C.H., Horrocks R.D. CORNMOD, a dynamic simulator of corn production. *Agric. Syst.*, 1976, vol. 1, no. 1, pp. 57-77.
30. Bannayan M., Crout N.M.J., Hoogenboom G., 2003. Application of the CERES-Wheat model for within-season prediction of winter wheat yield in the united kingdom. *Agron. J.*, 2003, vol. 95, pp. 114-125.
31. Poluektov R.A. et al. AGROTOOL – a system for crop simulation. *Archive of Agronomy and Soil Sciences*, 2002, vol. 48, pp. 609-636.
32. Rickman R.W., Ramig R.E., Allmaras R.R. Modeling dry matter accumulation in dry land winter wheat. *Agron. J.*, 1975, vol. 67, pp. 283-289.

Поступила 13.05.2022; одобрена после рецензирования 16.11.2022;
принята в печать 29.11.2022.
Submitted 13.05.2022; approved after reviewing 16.11.2022;
accepted for publication 29.11.2022.