

УДК 633.1:570

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2011 Е.В. Самохвалова

Самарская государственная сельскохозяйственная академия, г. Кинель, Самарской обл.

Поступила 11.01.2010

Приведены результаты и оценка точности моделирования продукционного процесса озимой и яровой пшеницы, а также ячменя с использованием биологических параметров, определенных на основе трехлетних параллельных наблюдений за агрометеорологическими условиями и состоянием почвы и посевов сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: *продукционный процесс растений, моделирование, агрометеорологические условия, биологические параметры, ростовые функции*

Сегодня трудно себе представить какую-либо область производственной деятельности без использования информационных технологий, компьютерной техники для поддержки принимаемых хозяйственных решений, выбора направления действий или исследований.

В агрономии, в частности, в настоящее время сложился, своего рода, информационный кризис [1], когда трудность возникает при выборе правильного решения во множестве предлагаемых сельскохозяйственной наукой вариантов воздействия на почву и посев для обеспечения наилучшего результата. Обусловлена такая ситуация широким выбором сельскохозяйственных культур и сортов, сложной технологией их возделывания, разнообразием существующей техники, агрохимических средств, необходимостью учитывать многие природные факторы среды, с которой взаимодействуют растения, и собственно характер этих взаимодействий и пр. Все это свидетельствует о необходимости создания информационных систем, баз знаний, математических моделей и вычислительных программных комплексов и использование их в деятельности руководителей и специалистов сельскохозяйственного производства.

С середины XX в. математизация биологической и сельскохозяйственной наук осуществляются достаточно интенсивно [2]. Первоначально разрабатывались эмпирико-статистические модели типа «черного ящика», связывающие, например, урожайность сельскохозяйственной культуры на «выходе» модели с одним или несколькими воздействующими факторами на «входе».

Впоследствии по мере изучения «черного ящика» стал применяться физико-статистический анализ отдельных биохимических процессов растений, интенсивности физиологических их изменений и степени влияния внешних факторов. В результате, в 50-х годах XX в. сформировалась фотосинтетическая теория продуктивности растительных сообществ, прогресс произошел в исследованиях процессов энерго- и массообмена в системе «почва – растение – атмосфера», сформули-

рованы экологические принципы максимальной продуктивности посевов [3-5].

В последние десятилетия предпринимаются попытки имитационного динамического моделирования продукционного процесса растений, и в России и за рубежом разработан ряд моделей формирования урожая сельскохозяйственных культур [6-8]. В основе такого рода моделей заложены физически обоснованные уравнения пошагового расчета фотосинтеза, транспирации, прироста биомассы и других процессов, характерных для любого растительного организма. Конкретизация модели для расчета продукционного процесса определенной культуры осуществляется с помощью задания набора биологических параметров культуры (температуры начала роста, биологической суммы активных температур, глубины проникновения корней, коэффициентов расчета хозяйственно-ценной части урожая и пр.).

В учебной и научной литературе можно найти значения многих из требуемых параметров основных сельскохозяйственных культур. Но их использование для расчетов возможно лишь после тщательной проверки адекватности в условиях исследуемого региона, поскольку почвенно-климатические условия и периоды лет, когда они определялись, используемые методики, изучаемые сорта культур сильно различались.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Данная работа посвящена исследованию и конкретизации параметров, отражающих особенности роста и развития зерновых культур, и моделированию их продукционного процесса в условиях Самарской области. Для достижения цели исследований решались следующие задачи: организация и проведение регулярных параллельных наблюдений за агрометеорологическими условиями и за состоянием посевов сельскохозяйственных культур; по данным наблюдений расчет биологических параметров и функций их изменения в ходе вегетации; математическое моделирование продукционного процесса растений с использованием вновь определенных параметров; оценка точности моделирования.

В данном случае приводим результаты исследований по характеристике озимой и яровой пшеницы, а также ячменя, наиболее широко рас-

Самохвалова Елена Владимировна, канд. географич. наук, доц., e-mail: kinel_ev@mail.ru

пространенных в сельскохозяйственных регионах Российской Федерации. В Самарской области эти культуры занимают большую часть зернового клина, являются традиционными, технологии их возделывания преимущественно отработаны, биологические характеристики достаточно изучены. Вместе с тем для имитационного моделирования процессов роста и развития растений, формирования продуктивности необходимо также количественно описать их физиологические особенности, отражающие интенсивность и направленность процессов накопления биомассы растением.

МЕТОДИКА И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В основе динамического моделирования процесса формирования урожая культур лежит методика пошагового расчета накопления биомассы растений по органам. При этом на каждом временном шаге для биомассы листьев, стеблей, корней и колосьев растения (m_k) составляется уравнение баланса:

$$\frac{dm_k}{dt} = U_k + Z_k - Y_k + D_k, \quad (1)$$

где U_k – величина ассимилятов, образующихся в результате фотосинтеза за единичный интервал времени; Z_k – величина перераспределяемых ассимилятов; Y_k – величина, характеризующая пожелтение и отмирание фитомассы; D_k – величина ассимилятов, поступающих за единичный интервал времени из семени растения при весеннем отрастании или из корней озимых культур.

Каждый из приведенных в уравнении (1) потоков ассимилятов определяется способностью растения распределять их между органами определенным образом. Поэтому рассматриваемая модель содержит ряд биологических параметров, значения которых характеризуют долю ассимилятов, поступающих в тот или иной орган растения или затрачиваемый им. Изменение же этих параметров в течение вегетационного периода отражает развитие растений в онтогенезе.

Для достижения поставленных целей нами проведены полевые наблюдения в 2002-2004 гг. на базе шестипольного севооборота Поволжского НИИ селекции и семеноводства по схеме чистый пар – озимая пшеница – яровая пшеница – гречиха – яровая пшеница – ячмень. Почва на наблюдательном участке тяжелосуглинистая – чернозем обыкновенный среднемощный. Агротехника возделывания культур была общепринятая: вспашка зяби на глубину 20-22 см, весеннее покровное боронование почвы, предпосевная культивация на глубину 6-8 см, в 2002 и 2004 гг. обработка посевов гербицидами.

Агрометеорологические условия в годы исследований различались как по температурному режиму, условиям перезимовки растений, так и по характеру увлажнения. Поэтому темпы развития рассматриваемых культур, увеличения их массы,

размеров, а также величина урожайности существенно различались по годам. Тем более интересными представляются результаты и выводы, полученные при обобщении наблюдений за посевами в столь разных условиях.

В 2002 г. при благоприятных условиях предшествующего осенне-зимнего периода и начала весны для посевов озимых культур отмечались засушливые условия в теплый период года. Гидротермический коэффициент (ГТК) с мая по июль составил 0,5. В результате, продуктивность яровой пшеницы и ячменя была значительно снижена, урожайность составила всего 12-15 ц/га. Урожайность озимой пшеницы достигла 38 ц/га.

В 2003 г. озимые культуры уже весной были ослабленными и изреженными в результате слабого осеннего развития и сложных условий перезимовки. Но условия весенне-летнего периода оказались благоприятными для сельскохозяйственных культур, ГТК составил 1,1. Урожайность озимой пшеницы составила всего 24 ц/га, яровой пшеницы и ячменя 17 и 23 ц/га соответственно.

Условия 2004 г. примерно соответствовали среднемноголетним, ГТК оказался равным 0,9. Однако запоздание с посевом ранних яровых культур на 7-12 дней предопределило прохождение растениями вегетативного развития в более теплых условиях и ускоренными темпами. Это привело к снижению их продуктивности, урожайность яровой пшеницы достигла 18 ц/га, ячменя – лишь 14 ц/га.

Отбор проб растений и почвы осуществлялся в трех повторностях. В течение вегетационного периода проводились фенологические наблюдения, а также морфологический и фитометрический анализы надземных органов растений, определение их сухой массы, определение влажности почвы еженедельно.

На основе собранных данных наблюдений на каждую дату анализа растительных образцов рассчитан ряд коэффициентов:

$$\alpha_{\phi\delta} = \frac{\Delta m_{\text{сут.}\phi\delta}}{\Delta m_{\text{сут.}\text{расм.}}} - \quad (2)$$

ростовые коэффициенты, характеризующие распределение вновь образовавшихся в процессе фотосинтеза ассимилятов на том или ином временном шаге;

$$\lambda = \frac{\Delta m_{\text{сут.}\phi\delta}}{m_{\text{ср.}\phi\delta}} - \quad (3)$$

коэффициенты оттока биомассы в репродуктивные органы, характеризующие перераспределение запасенных ранее ассимилятов между органами растения;

$$\gamma = \frac{S_{\text{зел.}\phi\delta}}{S_{\phi\delta}} - \quad (4)$$

коэффициенты, характеризующие «пожелтение» и отмирание надземных органов растения. В формулах (2) – (4): $\Delta m_{\text{сут.}\phi\delta}$ – средний суточный прирост биомассы фитоэлемента за период между

датами взятия проб растений (ц/га), $\Delta m_{\text{сум.раст.}}$ – то же всего посева, $S_{\text{фэ}}$ – индекс площади поверхности фитоэлемента (безразмерный), в том числе зеленой поверхности – $S_{\text{зел.фэ}}$.

В соответствии с методикой, описанной в работе [8], все биологические функции можно представить единым аналитическим выражением:

$$f = a_1 \exp \left[-a_2 \left(\frac{\sum T_{\text{эф}} - a_3}{100} \right) \right], \quad (5)$$

где f – любая из перечисленных выше функций; $\sum T_{\text{эф}}$ – сумма эффективных температур воздуха (для рассматриваемых культур превышающих 5°C), играющая роль биологического времени; a_1 – коэффициент, соответствующий максимальному значению функции; a_2 – коэффициент, характеризующий «крутизну» графика функции; a_3 – сумма эффективных температур, при которой достигается максимум функции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методом регрессионного анализа данных агрометеорологических наблюдений и наблюдений за состоянием посевов ячменя, яровой и озимой пшеницы за 2002-2004 гг. найдены коэффициенты a_1 , a_2 и a_3 биологических функций для листьев, стеблей и колосьев каждой из рассматриваемых культур. Результаты подробно описаны в отчете [9]. На рис. 1-3 в качестве примера представлены распределения, отражающие параметры вегетативного роста, оттока ассимилятов и «пожелтения» и отмирания фитомассы для листьев озимой пшеницы. На рисунках f – значение функции (без размерности), $T_{\text{эф}}$ – сумма эффективных температур выше 5°C ($^\circ\text{C}$), точками обозначены фактические значения соответствующих коэффициентов за годы исследований.

Относительная ошибка расчета функций «пожелтения» и отмирания фитомассы растений, а также оттока биомассы в репродуктивные органы по культурам не превышает 10%. Точность аппроксимации ростовых функций яровых культур также находится в пределах 10%, у озимой пшеницы в связи с большей дисперсией показателя ошибка достигает 17%.

Из всех изучаемых функций наибольший вклад в формирование биомассы растений дают ростовые, отражающие распределение ассимилятов, образованных в процессе фотосинтеза по органам растений. Такие распределения для ячменя, яровой и озимой пшеницы получены по данным за 2002-2004 гг. и приведены на рис. 4, 5 и 6 в процентах от общего количества образованных ассимилятов. При общей схожести полученных

диаграмм, биологические особенности каждой культуры явно заметны.

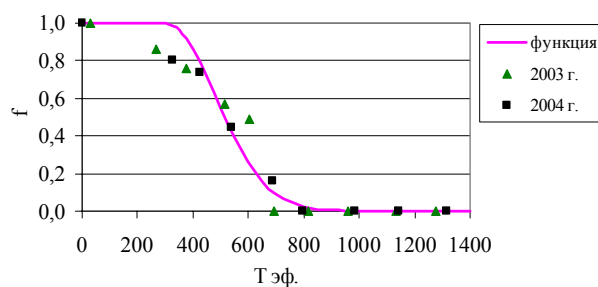


Рис. 1. Функция «пожелтения» и отмирания листьев озимой пшеницы в ходе вегетации

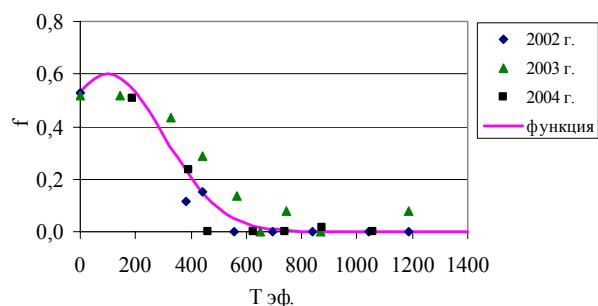


Рис. 2. Функция роста колосьев озимой пшеницы в ходе вегетации

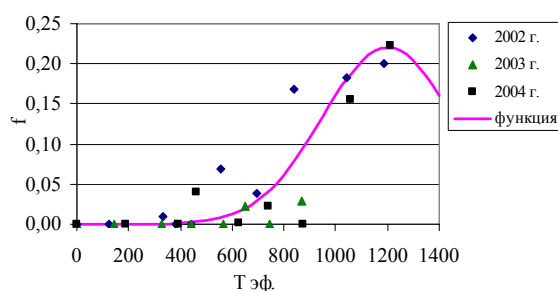


Рис. 3. Функция оттока биомассы из листьев озимой пшеницы в ходе вегетации

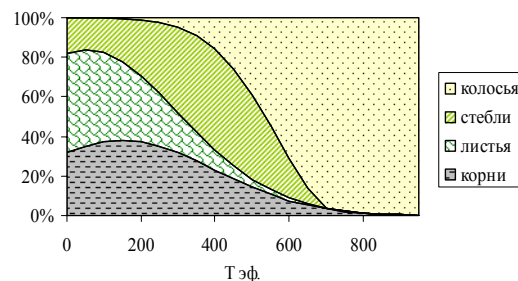


Рис. 4. Распределение продуктов фотосинтеза по органам ячменя в ходе вегетационного периода

Ячмень, как известно, характеризуется интенсивным ростом вегетативных органов в короткие сроки, формирует в это время достаточно мощную корневую систему и листовую поверхность. Согласно рис. 4 в период всходов (это соответствует 0°C эффективных температур) около 50 %

ассимилятов идут на формирование листьев, 30 % – корней и 20 % – стеблей.

По нашим данным закладка колоса и отток из него ассимилятов начинается со времени накопления 200 °С эффективных температур. К началу репродуктивной стадии развития (колошение ячменя отмечается уже 40-45 день вегетации при 450-500 °С эффективных температур) затраты ассимилятов на формирование колоса достигают 30-35 %, рост листовой поверхности значительно снижается – поток ассимилятов составляет менее 5 %, затраты на увеличение массы корней снижены до 20 % и остальные 40-50% продолжают идти на вытягивание стеблей. Начиная с 700-750 °С эффективных температур практически все продукты фотосинтеза идут в колос, с этого времени (55-66 день от появления всходов) согласно нашим данным растения вступают в фазу молочной спелости.

Из агрономической и биологической литературы известно, что у растений яровой пшеницы в начале вегетации наиболее активно развиваются зародышевые корни и листовая поверхность. Наши данные (рис. 5) показывают, что затраты ассимилятов в эти органы на период всходов составляют 40 и 45 % соответственно.

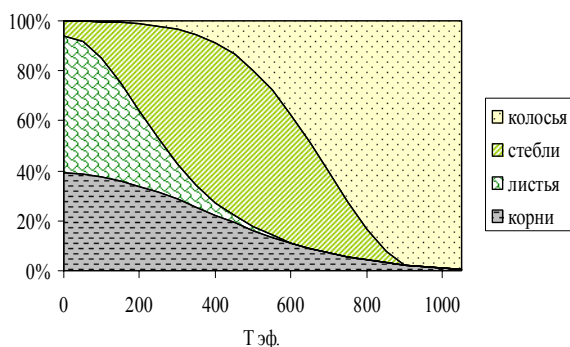


Рис. 5. Распределение продуктов фотосинтеза по органам яровой пшеницы в ходе вегетационного периода

К началу колошения яровой пшеницы (40-49 день периода вегетации при накоплении 520-550 °С эффективных температур) на формирование и рост колоса растение отдает 20 % ассимилятов, примерно столько же на развитие корневой системы и остальные 60 % – на рост и укрепление стеблестоя. По мере приближения к 900 °С эффективных температур (56-70 день от появления всходов), когда яровая пшеница находится в фазе молочной спелости, поток ассимилятов в репродуктивные органы достигает почти 100 %.

Особенностью озимой пшеницы является более растянутое во времени протекание вегетативного развития и более равномерное накопление биомассы органов по сравнению с яровыми культурами. Это связано с умеренным и пониженным температурным режимом в этот период (осенью и после возобновления вегетации весной), а также с интенсивным кущением озимой пшеницы и обра-

зованием большего числа побегов. В начале вегетации около 55 % ассимилятов растения затрачивают на формирование листьев (рис. 6). В корни в этот период идет сравнительно небольшое их количество – лишь 25 %, остальные 20 % – в стебли.

По нашим данным озимая пшеница вступает в фазу колошения на 88-110 день вегетации при накоплении 550-650 °С эффективных температур. В этот период поток ассимилятов в колос еще невелик (около 10-15 %), продолжают «прирастать» листья и корни, и большая часть ассимилятов идет на формирование стеблестоя – около 70 %.

Ко времени же накопления 900-950 °С эффективных температур, когда растения находятся в фазе молочной спелости зерна, поток в стебли прекращается, и в дальнейшем набирают биомассу лишь колосья. Завершение ростовых процессов озимой пшеницы и наступление фазы восковой спелости отмечаются при достижении суммы эффективных температур 1100-1200 °С, накапливаемой к 120-140 дню периода вегетации культуры.

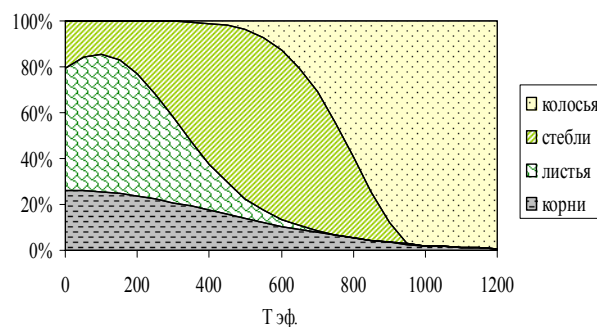


Рис. 6. Распределение продуктов фотосинтеза по органам озимой пшеницы в ходе вегетационного периода

Приведенные результаты хорошо согласуются с данными других авторов по срокам наступления фенологических фаз и темпам развития рассматриваемых зерновых культур. При этом в работе получены и значения параметров накопления ассимилятов органами растений и их изменений в ходе вегетации.

С использованием вновь определенных биологических функций, в том числе ростовых, произведен расчет продукционного процесса рассматриваемых культур за 2002-2004 гг. Модель продукционного процесса в качестве «входной» информации использует наряду с параметрами сельскохозяйственных культур также агроэкологические характеристики почвы и метеорологические показатели (среднесуточные значения температуры и влажности воздуха, суточные суммы осадков и продолжительности солнечного сияния).

Рассчитанная с суточным временным шагом динамика накопления биомассы растений сравнена с данными фактических наблюдений. Резуль-

таты за 2004 г. с оценкой их точности представлены для наглядного сопоставления на рисунках 7, 8, 9 (m – сухая биомасса, ц/га; N – номер дня от появления всходов; R – коэффициент корре-

ляции; d – средняя квадратическая невязка, ц/га).

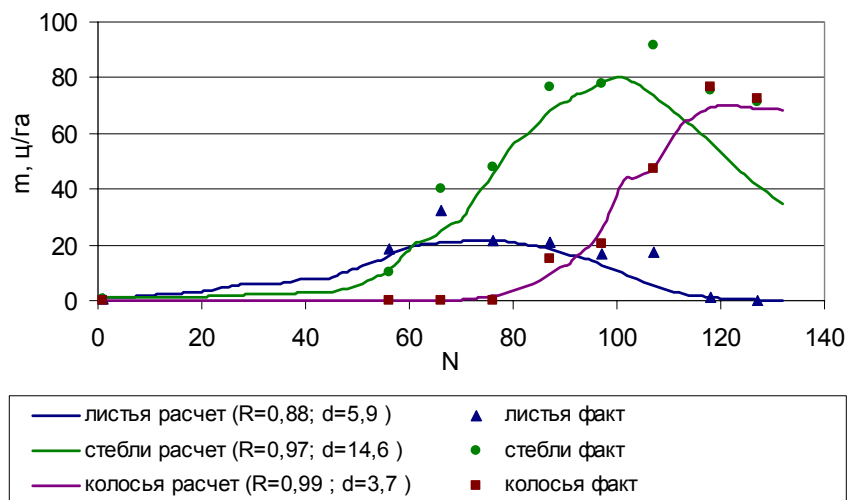


Рис. 7. Динамика сухой биомассы озимой пшеницы, Поволжская 86, 2004 г.

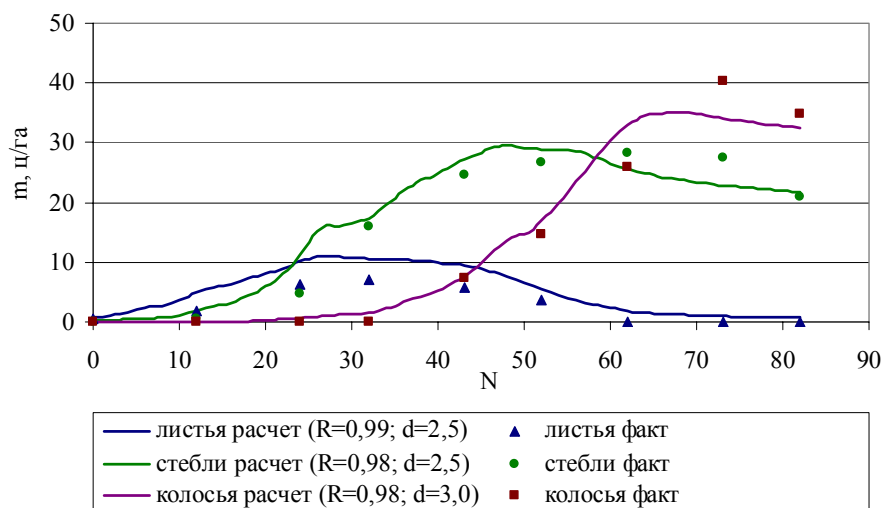


Рис. 8. Динамика сухой биомассы яровой пшеницы, Кинельская 61, 2004 г.

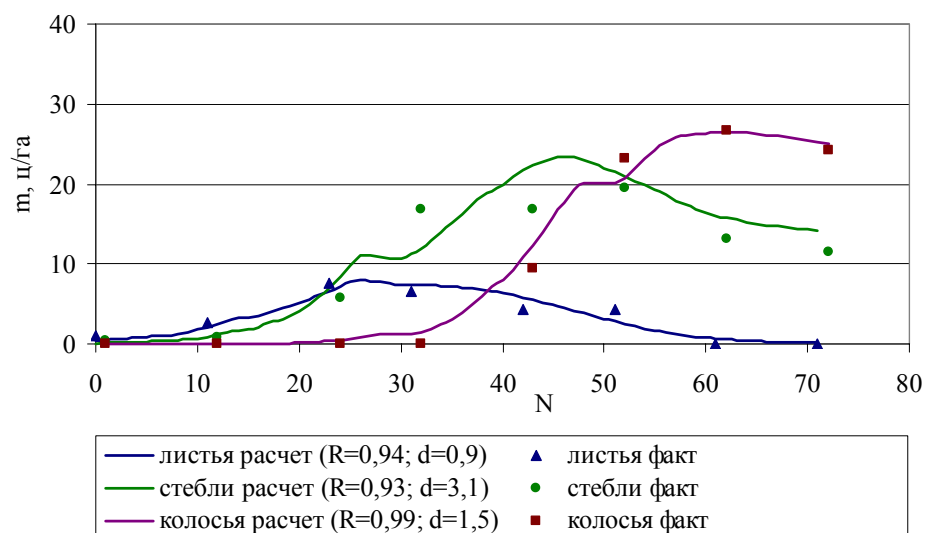


Рис. 9. Динамика сухой биомассы ячменя, Волгарь, 2004 г.

Отмечается хорошее соответствие расчетных данных биомассы надземных органов растений фактическим – коэффициенты корреляции для всех культур оказались не менее 0,8. При этом значения средней квадратической невязки расчета биомассы листьев, стеблей и колосьев преимущественно находятся в пределах 25 % погрешности расчета и свидетельствуют об удовлетворительной точности моделирования продукционного процесса каждой из рассматриваемых культур [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, получены значения биологических коэффициентов зерновых культур и функций их изменения в ходе вегетационного периода, количественные различия которых позволяют моделировать по единой расчетной схеме продукционный процесс каждой из культур. Достигнутая точность моделирования обосновывает использование в практических задачах данной имитационной модели формирования урожая и определенных в работе биологических параметров ячменя, яровой и озимой пшеницы для характеристики их продукционного процесса в различных агрометеорологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Франс Д., Торнли Дж. Математические модели в сельском хозяйстве. М.: Агропромиздат, 1987. 400 с.
2. Клещенко А.Д., Грингоф И.Г. Развитие наблюдений и исследований в области сельскохозяйственной метеорологии // Очерки по истории гидрометеорологической службы России: Т. 3., СПб.: Гидрометеоздат, 2007. С. 215-248.
3. Ничипорович А.А. Теория фотосинтетической продуктивности растений // Физиология растений. 1977. Т. 3.
4. Нертин С.В., Чудновский А.Ф. Энерго- и массообмен в системе растение – почва – воздух. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.
5. Тооминг Х.Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. Л.: Гидрометеоздат, 1984.
6. Полуэктов Р.А. и др. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. 396 с.
7. Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур / под ред. Ф.В.Т.П. де Фриза, Х.Х. ван Лаар. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 320 с.
8. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование вводно-теплого режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 167 с.
9. Кадастровая оценка посевных площадей на основе моделирования урожайности сельскохозяйственных культур: отчет о НИР (заключит.) / ВНИЦентр; рук. Самохвалова Е.В.; исполн.: Самохвалова Е.В. и др. Кинель: ФГОУ ВПО СГСХА, 2007. 70 с.: № ГР 01.200506418. Инв. № 02.200801945.

GRAIN CROPS BIOLOGICAL FUNCTIONS AND GROWTH MODELING IN SAMARA AREA CONDITIONS

© 2011 E.V. Samokhvalova

Samara State Agricultural Academy, Kinel'

Results and precision estimation of modeling of barley, spring and winter wheat growth are given. Biological parameters determined in the three-year parallel agrometeorological observations for weather, soil and crop in the Samara area are used.

Keywords: crop growth process, modeling, agrometeorological conditions, biological parameters, growth functions