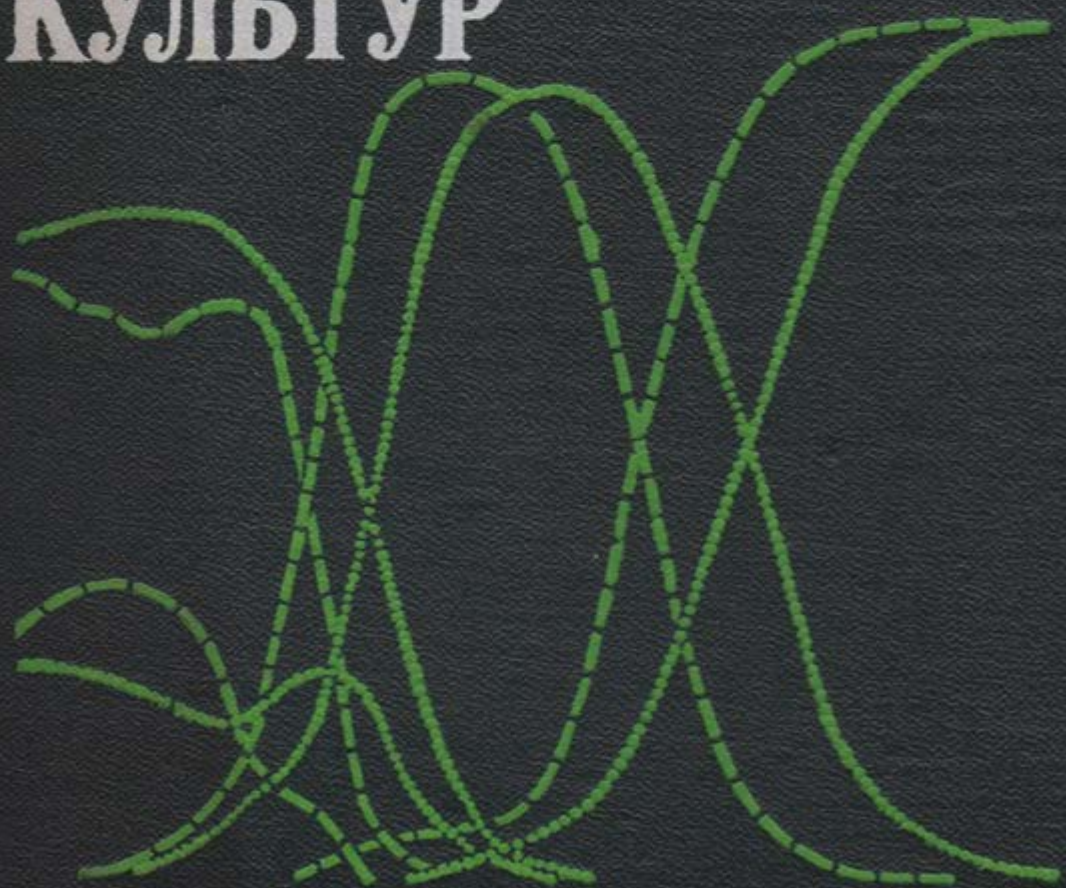


А. Н. ПОЛЕВОЙ

ТЕОРИЯ
И РАСЧЕТ
ПРОДУКТИВНОСТИ
СЕЛЬСКО-
ХОЗЯЙСТВЕННЫХ
КУЛЬТУР



УДК 631.559 : 551.5(470.31)

Рецензент: д-р физ.-мат. наук Э. Г. Палагин

Ответственный редактор: д-р физ.-мат. наук, проф. Ю. К. Росс

Монография посвящена проблеме влияния агрометеорологических условий на фотосинтетическую продуктивность посевов сельскохозяйственных культур. Приводится количественное описание воздействия засух, заморозков и повреждения растений болезнями на основные процессы жизнедеятельности растений. Особое внимание уделяется методам определения параметров моделей продукционного процесса и вопросам географической изменчивости параметров моделей.

Предложен комплекс динамико-статистических методов оценки агрометеорологических условий произрастания и прогноза урожайности сельскохозяйственных культур в Нечерноземье. На основе этого комплекса разработана методика прогнозирования применительно к конкретным почвенно-климатическим зонам.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, изучающих влияние факторов внешней среды на продуктивность сельскохозяйственных культур.

The monograph "Theory and calculation of crop productivity" by A. N. Polevoy is devoted to the problem of the effect of agrometeorological conditions on the photosynthetic productivity of crops. A quantitative description of the effect of drought, frosts, and plant diseases upon main processes of vital activities of plants is given. A special attention is paid to the methods for determining the parameters of models of the productional process and to the problems of geographical variability of model parameters.

A complex of dynamic-statistical methods of assessing agrometeorological conditions for plant growth and of forecasting crop yields in the non-chernozem zone is proposed. The method for the development of forecast techniques for specific soil-climatic zones is presented.

The book is intended for specialists studying the impact of environment factors upon the productivity of crops.

Большая часть сельскохозяйственных угодий нашей страны расположена в районах с неустойчивым увлажнением или ограниченными ресурсами тепла, что обуславливает колебания урожайности сельскохозяйственных культур. Из десяти последних лет (1972—1982 гг.) практически в пяти наблюдалось значительное снижение урожаев сельскохозяйственных культур, вызванное воздействием неблагоприятных погодных условий.

Июльский (1978 г.) и майский (1982 г.) Пленумы ЦК КПСС в качестве одной из основных задач сельскохозяйственного производства поставили получение высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур. Разработана специальная Продовольственная программа, реализация которой должна обеспечить значительное увеличение производства сельскохозяйственной продукции [2, 3].

Особое место в сельском хозяйстве страны отводится Нечерноземной зоне РСФСР, возделыванию в этой зоне зерновых культур и картофеля [1].

Производство сельскохозяйственной продукции требует глубокой и всесторонней оценки влияния погодных условий на формирование продуктивности сельскохозяйственных культур.

Исследование воздействия агрометеорологических факторов на продуктивность посевов, прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур является главной проблемой агрометеорологии. Значительный вклад в ее решение внесли Р. Э. Давид, В. М. Обухов, Н. А. Зубарев, С. А. Вериге, Л. А. Разумова, Е. А. Цубербиллер, А. В. Процеров, М. С. Кулик, Е. С. Уланова, Ю. И. Чирков, К. В. Кириличева, В. А. Моисейчик, А. П. Федосеев, Р. Фишер, В. Байер и др.

Задачи развития сельского хозяйства в Нечерноземье, поставленные партией и правительством, делают весьма актуальной проблему изучения влияния агрометеорологических условий на продуктивность сельскохозяйственных культур в этом районе страны, развития научно-методической базы агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства.

Прогнозирование продуктивности сельскохозяйственных культур и объективная оценка сложившихся агрометеорологических условий их произрастания в условиях планового социалистического сельского хозяйства приобретают особое значение. Плани-

рование закупок и заготовок сельскохозяйственных продуктов, маневрирование уборочной техникой и средствами транспорта опираются на заблаговременное предвычисление ожидаемого урожая.

Вопросам агрометеорологического прогнозирования уделяется большое внимание. Опираясь на целый ряд общебиологических концепций (неравнозначность факторов среды, незаменимость факторов жизни, законы минимума, оптимума, максимума и взаимодействия факторов роста и развития растений), М. С. Кулик, Е. С. Уланова, А. В. Процеров, Ю. И. Чирков, К. В. Кириличева, В. А. Моисейчик и А. П. Федосеев сформулировали основные теоретические положения агрометеорологического прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур и трав и разработали методы агрометеорологических прогнозов урожайности сельскохозяйственных культур для различных регионов страны.

Однако, несмотря на большие успехи, достигнутые в разработке методов оценки агрометеорологических условий произрастания сельскохозяйственных культур в весенне-летний период и методов прогноза их продуктивности, имеющиеся для территории Нечерноземья методы прогнозирования урожайности немногочисленны, а их обоснования содержат те или иные существенные ограничения.

Современная количественная теория фотосинтетической продуктивности посевов, развитие которой определили работы А. Н. Ничипоровича, А. И. Будаговского, Ю. К. Росса, Х. Г. Тооминга, М. И. Будыко, О. Д. Сиротенко, М. Монси, Т. Саэки, де Вита, Р. Броувера, Пеннинга де Фриса и др., позволяет рассмотреть процесс формирования урожая как сложную совокупность целого ряда физиологических процессов, интенсивность и направленность которых определяются генотипом и факторами внешней среды. В агрометеорологии впервые основные положения этой теории применены Ю. И. Чирковым.

В настоящей работе предпринята попытка, опираясь на достигнутый уровень агрометеорологического прогнозирования и основные положения количественной теории фотосинтеза, исследовать влияние агрометеорологических условий на фотосинтетическую продуктивность посевов сельскохозяйственных культур, разработать комплекс методов оценки агрометеорологических условий произрастания этих культур и прогнозирования их продуктивности в Нечерноземье.

При решении поставленной проблемы в качестве ключевых рассматривались две группы вопросов.

Первая группа вопросов — количественное описание влияния факторов внешней среды на основные процессы жизнедеятельности растений, особенно моделирование влияния экстремальных условий погоды (засухи, заморозки), определяющих значительные колебания урожайности сельскохозяйственных культур.

Наряду с теоретическими представлениями о процессе форми-

рования урожая конкретной культуры в предложенных нами моделях продукционного процесса содержатся количественные характеристики — параметры. Определение параметров моделей, оценка их географической изменчивости составляют вторую, не менее важную, чем первая, группу вопросов. Для практического использования моделей прежде всего необходимо разработать методы идентификации параметров моделей на основе стандартной агрометеорологической информации. Эти вопросы являются особенно важными с точки зрения использования моделей продукционного процесса в качестве основы для методов агрометеорологических расчетов и прогнозов.

Решение указанных вопросов позволило нам на этой основе разработать комплекс методов оценки агрометеорологических условий произрастания основных сельскохозяйственных культур в Нечерноземье. Весьма существенной при этом представлялась разработка адаптивных методов оценок, позволяющих по мере поступления текущей информации о развитии и состоянии сельскохозяйственных культур корректировать часть параметров моделей.

Исходя из того, что оценка агрометеорологических условий формирования урожая характеризует только условия формирования биологического урожая, тогда как объектом прогнозирования является уровень хозяйственного урожая, осуществлен синтез динамического и статистического подходов, и на этой основе предложен комплекс методов агрометеорологических прогнозов урожайности основных сельскохозяйственных культур в Нечерноземье.

В настоящей работе обобщены результаты исследований автора (1970—1980 гг.), при выполнении которых были использованы материалы агрометеорологических наблюдений на агро- и гидрометеорологических станциях Госкомгидромета, данные специальных наблюдений (1971—1977 гг.), организованных в различных почвенно-климатических зонах страны, а также результаты полевых экспериментов (1976—1979 гг.), проведенных при участии автора в Подмосковье.

Монография посвящена вопросам влияния факторов внешней среды на продуктивность сельскохозяйственных культур и методам прогнозирования урожайности этих культур в Нечерноземье. Исследования были начаты по инициативе Максима Саввича Кулика, в значительной степени способствовавшего формированию научных интересов автора. На различных этапах исследований автор пользовался неизменной поддержкой и вниманием проф. Е. С. Улановой, Ю. И. Чиркова, А. И. Коровина, Ю. К. Росса, д-ра геогр. наук В. А. Моисейчик и д-ра биол. наук Х. Г. Тооминга.

Автор считает своим приятным долгом выразить глубокую признательность коллективу отдела агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра СССР и отдела агрометеорологии ВИР за доброжелательное внимание и обсуждение результатов исследо-

ний. Появлению книги способствовало многолетнее сотрудничество с Т. Н. Мызшой, Т. А. Гончаровой, И. Е. Вольвач, Ф. С. Рачкулик, с которыми был выполнен ряд совместных работ, а также обсуждение ряда задач с В. Н. Страшным, Ю. С. Мельником, А. П. Деревянко и М. Г. Лубниным.

Большую помощь при выполнении различных расчетов и подготовке рукописи к печати оказали Н. Ф. Мищенко, О. И. Юдина, Т. С. Глущенко, А. В. Смирнова, Л. М. Осицына, Н. А. Конова, А. Л. Роганова, за что автор выражает им глубокую благодарность.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Величина	Обозначение	Единица СИ
Параметры уравнений (4.8), (2.14) и (4.29)	a, a_g, a_i	Величина безразмерная
Начальный наклон световой кривой фотосинтеза	$a_{\Phi i}$	$\frac{\text{мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}}{\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}}$
Параметры уравнений (4.8), (2.14) и (4.9)	b, b_g, b_i	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Оценка агрометеорологических условий формирования урожая	C	Величина безразмерная
Коэффициент дыхания роста	c_G	То же
Доля биомассы i -го органа в биомассе целого растения при его созревании	c_i	„
Коэффициент дыхания поддержания	c_m	$\text{г}_{\text{с. в}} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$
Эмпирическая постоянная в уравнении (2.34)	c_Q	Величина безразмерная
Интенсивность гетеротрофной фиксации CO_2	D	$\text{г}_{\text{с. в}}^* \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$
Параметры уравнения (2.4)	d_0, d_1, d_2	Величина безразмерная
Суммарное испарение за сутки	E	мм
Испаряемость за сутки	E_0	мм
Параметр уравнения (2.43)	f	Величина безразмерная
Глубина залегания грунтовых вод	H	м
Полуденная высота Солнца	h_{Π}	\dots°
Интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) в посеве	I	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$
Интенсивность ФАР на верхней границе посева	I_0	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$
Параметр, характеризующий степень повреждения растений заморозком	k_f	Величина безразмерная
Константа Михаэлиса—Ментен	k_g	$\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$
Параметр, характеризующий степень повреждения растений инфекцией	k_{inf}	Величина безразмерная
Параметр, характеризующий долю жизнедеятельных структур и подвижных углеводов в общей биомассе органа	k_s	То же
Параметр, характеризующий изменение ростовой функции в зависимости от интенсивности заморозка	k_{vf}	„

* Здесь и далее $\text{г}_{\text{с. в}}$ — грамм сухого вещества.

Относительная площадь ассимилирующей поверхности i -го органа	L_i	$\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$
Сухая биомасса посева	M	$\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$
Запасы питательных веществ материнского клубня	M_c	$\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$
Прирост биомассы посева	$\Delta M / \Delta t$	$\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{дек}^{-1}$
Максимально возможная масса зерна	$m_{g \cdot \max}$	$\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$
Максимально возможная масса 1000 зерен	$m_{g \cdot v}$	$\text{г} \cdot \text{зерно}^{-1}$
Сухая биомасса i -го органа	m_i	$\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$
Функционирующая биомасса i -го органа	\tilde{m}_i	$\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$
Скорость роста i -го органа	$\Delta m_i / \Delta t$	$\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$
Густота стояния растений	N_S	$\text{раст} \cdot \text{м}^{-2}$
Число зерен в колоске	n_g	$\text{зерно} \cdot \text{колосок}^{-1}$
Количество облаков в долях единицы нижнего яруса и общей облачности	n_n, n	Величина безразмерная
Число колосков в колосе	n_p	$\text{колосок} \cdot \text{колос}^{-1}$
Суммарная радиация	Q	$\text{Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$
Суммарная радиация при ясном небе	Q_0	$\text{Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$
Температурный коэффициент дыхания	Q_{10}	Величина безразмерная
Интенсивность дыхания роста	R_G	$\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$
Интенсивность дыхания поддержания структур	R_m	$\text{г}_{с. в} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$
Продуктивная кустистость	S_p	$\text{колос} \cdot \text{раст}^{-1}$
Продолжительность солнечного сияния	SS	ч
Температура воздуха	T_A	$^{\circ}\text{C}$
Температура, при которой берется исходное (для расчета) значение дыхания	T_{A0}	$^{\circ}\text{C}$
Средняя дневная температура воздуха	T_d	$^{\circ}\text{C}$
Пороговая и оптимальная температура воздуха для фотосинтеза	$T_{d0}, T_{d \cdot \text{opt}}$	$^{\circ}\text{C}$
Максимальная температура воздуха за сутки	T_{\max}	$^{\circ}\text{C}$

Минимальная температура воздуха за сутки	T_{\min}	°C
Инфильтрация атмосферных осадков	U_W	мм
Расход грунтовых вод в зону аэрации за сутки	V	мм
Запасы продуктивной влаги в полуметровом слое почвы	W	мм
Наименьшая влагоемкость	W_{FC}	мм
Урожайность	Y	т · га ⁻¹
Прогнозируемая урожайность	Y_{Π}	т · га ⁻¹
Прогнозируемая тенденция урожайности	Y_{t+1}	т · га ⁻¹
Функция влияния возраста i -го органа на интенсивность фотосинтеза	$\alpha_{\Phi i}$	Величина безразмерная
Функция влияния возраста i -го органа на интенсивность дыхания	α_{Ri}	То же
Ростовая функция вегетативного периода	β_i	„
Функция влияния влажности почвы на интенсивность фотосинтеза	γ_{Φ}	„
Склонение Солнца	δ	... °
Коэффициент для пересчета количества CO ₂ в единицы сухой массы	ε	г · мг ⁻² CO ₂
Параметр уравнения (2.44)	η	Величина безразмерная
Сумма осадков за сутки	θ	мм
Коэффициент, характеризующий скорость перетока питательных веществ из материнского клубня	κ	°C ⁻¹ , сут ⁻¹
Биомасса i -го органа растения	μ_{it}	Величина безразмерная
Биомасса растения	μ_t	То же
Коэффициент водоотдачи грунтов	ξ	„
Удельная поверхностная плотность i -го органа	σ_i	г · м ⁻²
Время восхода и захода Солнца	$\tau_{\text{в}}, \tau_{\text{з}}$	ч
Продолжительность дня и ночи	$\tau_{\text{д}}, \tau_{\text{н}}$	ч
Фотосинтез посева за сутки	Φ	г · м ⁻² · сут ⁻¹
Фотосинтез i -го органа за светлое время суток	Φ_i	г · м ⁻² · сут ⁻¹
Интенсивность фотосинтеза i -го органа при световом насыщении и нормальной концентрации CO ₂	$\Phi_{\max i}$	мгCO ₂ · дм ⁻² · ч ⁻¹

Величина	Обозначение	Единица СИ
Интенсивность фотосинтеза i -го органа при оптимальных условиях тепло- и влагообеспеченности и реальных условиях освещенности	Φ_{0i}	$\text{мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$
Интенсивность фотосинтеза i -го органа в реальных условиях среды	$\Phi_{\tau i}$	$\text{мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$
Географическая широта местоположения пункта	φ	\dots°
Функция влияния температуры воздуха на дыхание	φ_R	Величина безразмерная
Ростовая функция репродуктивного периода	v_i	$\text{сут}^{-1}, ^\circ\text{C}^{-1}$
Функция влияния температуры воздуха на интенсивность ночной фиксации CO_2	ψ_D	Величина безразмерная
Функция влияния температуры воздуха на интенсивность фотосинтеза	ψ_Φ	То же
Коэффициент, характеризующий соотношение фотосинтетической и темновой фиксации в онтогенезе	ω	"
Сумма эффективных (активных) температур воздуха	$\sum T$	$^\circ\text{C}$
Сумма температур, накопившаяся до наступления фазы развития растений, в которую наблюдается максимальная интенсивность фотосинтеза i -го органа	$\sum T_{1i}$	$^\circ\text{C}$
Сумма температур за период, равный четверти периода от начала роста i -го органа до завершения роста	$\sum T_{2i}$	$^\circ\text{C}$
Сумма температур, характеризующая время начала роста стебля, репродуктивных органов и зерна	$\sum T_s, \sum T_p, \sum T_g$	$^\circ\text{C}$
Сумма температур, необходимая для завершения роста i -го органа и созревания растений	$\sum T_{\text{req}i}, \sum T_{\text{r}lp}$	$^\circ\text{C}$

Индексы:

A — воздух; f — растение, поврежденное заморозком; g — зерно; inf — растение, пораженное инфекцией; l — листья; p — колосья, клубни; r — корни; s — стебли; shoot — надземные органы; i — номер шага по времени; j — номер суток расчетного периода.

Примечание. Если то или иное обозначение используется для характеристики других величин, то это оговаривается в тексте.

ЧАСТЬ I

Влияние агрометеорологических условий на фотосинтетическую продуктивность посевов сельскохозяйственных культур

Развитие количественной теории продукционного процесса растений [15, 20—22, 29, 145, 146—148, 220, 224, 236, 255, 364, 397] позволяет приступить к созданию моделей формирования урожая сельскохозяйственных культур для целей агрометеорологии, используя в качестве основного аппарата исследования математическое моделирование. Одна из основных трудностей при разработке этих моделей — большое число параметров, которое априори необходимо принять во внимание, рассматривая влияние факторов внешней среды на важнейшие составляющие продукционного процесса. Включение в модель слишком большого числа параметров может сделать ее практически неприменимой, при ограничении их числа описание процесса будет менее точным.

Разработка динамических моделей продуктивности сельскохозяйственных культур позволит исследовать влияние агрометеорологических условий на важнейшие процессы жизнедеятельности растений, объяснить целый ряд особенностей воздействия этих условий на продуктивность растений, изучить адаптивные реакции растений на изменения условий внешней среды. Эти модели могут рассматриваться в качестве основы для разработки методов агрометеорологических расчетов и прогнозов.

Глава 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ УРОЖАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

1.1. Подходы к математическому моделированию продукционного процесса

Влияние факторов внешней среды на продуктивность сельскохозяйственных культур является предметом многочисленных исследований. Для изучения этого воздействия применяются различные методы. Представление (с помощью математических методов)

сложных связей между погодой или климатом, с одной стороны, и характеристиками урожая (рост, количество или элементы, составляющие структуру урожая), с другой,— можно определить как модель погода—урожай [309].

Основу динамических моделей продукционного процесса составляет математическое описание механизмов физиологических процессов, происходящих в течение данного временного интервала в системе растение—почва и в среде обитания растений, т. е. в системе атмосфера—почва. Разные авторы в зависимости от степени полноты разработки этого подхода называют его по-разному: физиологический или каузальный подход [361], детерминистский подход [365], имитационное моделирование [383], численное моделирование [339].

Представляет интерес классификация моделей погода—урожай, сделанная Байером [309]. Выделены, в частности, следующие категории моделей.

1. *Имитационные* модели роста механического типа (*crop growth simulation models*), определяемые как упрощенное математическое представление сложных физических, химических и физиологических механизмов, лежащих в основе роста растения. В этих моделях влияние метеорологических факторов (радиации, температуры и влажности воздуха, ветра и т. д.) на такие процессы, как фотосинтез, дыхание или транспирация моделируется с помощью системы уравнений, основанных на экспериментальных данных или доступных знаниях о процессе. В качестве типичных примеров таких моделей приводятся ELCROS [398], SPAM [377], SIMED [362].

2. *Аналитические* модели погода—урожай (*crop-weather analysis models*), в которых различные показатели агрометеорологических условий произрастания культуры (влажность почвы, эвапотранспирация и т. д.) рассчитываются или измеряются день за днем, а затем устанавливается их связь с ростом, развитием или урожаем культуры.

Наиболее удачными классификационными признаками для разных категорий моделей Байер [309] считает следующие: тип, временная шкала, источник данных, подход, цель разработки и применение. В этом плане имитационные модели роста по типу считаются детерминистскими (или обеспечивающими точное предсказание хода ростовых процессов), по временной шкале — динамическими, по источнику данных — основанными на экспериментальных данных, по подходу — физиолого-математическими, «причинными».

В имитационных динамических моделях погода—урожай учитывается влияние погоды на ход продукционного процесса и отдельных его составляющих. Характерные особенности такого подхода к изучению связей погода—урожай наиболее четко описаны, на наш взгляд, в монографии Ю. К. Росса и др. [15] и в обзоре [353].

В работе [353] многоуровневые модели, при построении кото-

рых используется физиологический подход, названы *explanatory models*, что в русском переводе принято как «объяснительные модели». Нам казалось бы более удачным перевести это понятие как «модели биологических систем, в которых математически сформулированы причинные связи между составляющими систему процессами разного уровня в динамике и в различных условиях внешней среды».

Авторы обзора [353] достаточно полно отразили преимущества системного подхода, используемого при разработке физиологически обоснованных моделей. Они подчеркивают, что динамические иерархические модели систем предназначены для того, чтобы объяснить и предвидеть интегральное поведение систем на основании точных знаний физиологических и морфологических процессов, составляющих основу системы. Благодаря иерархической структуре модели знания о системе, являющиеся описательными на низких ее уровнях, становятся для более высокого уровня знаниями, объясняющими причины поведения системы.

Для динамической модели характерно, что система описывается двумя типами переменных — переменными состояния (например, размеры биомассы органов растения) и переменными скорости (поток углерода при фотосинтезе и дыхании и др.). Изменения переменных состояния на любом шаге модели определяются переменными скорости.

Переменные скорости принимаются постоянными в пределах выбранного шага по времени, а изменение состояния — это произведение шага по времени на скорость.

Для расчета значений переменных скорости необходима информация об условиях внешней среды, которая поступает через внешние переменные (*forcing variables*) и информация о внутреннем состоянии системы, поступающая через внутренние переменные (*auxiliary variables*).

Росс и др. [15] называют теоретическими модели, строящиеся на основе описания наиболее важных физиологических процессов формирования урожая. Этот термин, несомненно, более удачен, чем принятый в зарубежной литературе термин «имитационная модель». В работе [15] в сжатой форме обобщены преимущества теоретических моделей и отмечено наиболее ценное их качество — прикладная значимость. Подчеркивается, что «...теоретическая модель продукционного процесса» является основой для научного земледелия, позволяет рассчитать нормы полива и дозы минерального удобрения, оценить состояние посевов сельскохозяйственных культур и прогнозировать их урожай». Росс подразделяет теоретические модели по своей внутренней структуре на три класса:

- 1) *статические модели*, не содержащие в явном виде фактора времени при описании физиологических процессов;
- 2) *короткопериодные динамические модели*, описывающие суточный ход продукционного процесса или его составляющих;

3) *длиннопериодные динамические модели*, описывающие продукционный процесс во всех его аспектах в течение всего вегетационного периода с суточным шагом по времени.

В зарубежной литературе также приводится, хотя гораздо менее полная, классификация моделей типа теоретических. Например, Майлз [363] предлагает термин «физиологически обоснованная модель культуры» (*physiology-based crop model*), понимая под этим модель, интегрирующую результаты моделирования физиологических процессов для оценки урожая в конце сезона.

В работе [339] введено понятие компьютерные (или численные) модели, которые подразделяются, в свою очередь, на две группы:

1) *большие модели роста растений* (такие, как ELCROS, SUBGRO, SIMCOT, SIMAIZ и т. д.);

2) *модели физиологических процессов*, описывающие различные процессы, протекающие в растении (фотосинтез и газообмен, поток воды в почве и растения, перенос, эвапотранспирация и т. д.).

Большие модели роста, на наш взгляд, занимают как бы среднее положение среди различных моделей сельскохозяйственных систем в иерархической схеме, предлагаемой в работе [363] (рис. 1.1). По мнению автора [363], физиологические модели, описывающие накопление сухой массы, охватывают два уровня: «экосистемы» и «элементы», хотя нам кажется, что сюда же следует отнести и уровень «компоненты». Включение этого уровня усиливает исследовательский характер модели ровно настолько, насколько это нужно для динамических моделей продукционного процесса, ориентированных на использование их в практике.

Характерной чертой моделей длиннопериодного типа, как это отмечает Росс и др. [15], является расчет роста целого растения или его отдельных органов. Применительно к продукционному процессу растений рост обычно понимается как накопление сухой биомассы. Заметим, однако, что рост растения или органа можно понимать и как процесс увеличения линейных размеров (например, рост растяжением), но этот процесс не определяет размеров урожая, хотя моделирование процесса деления клеток [388] или их растяжения [117] может иметь вспомогательное значение при моделировании накопления сухого вещества растениями.

Один из них является эмпирическим и состоит в аппроксимации прироста как функции времени соответствующими математическими уравнениями разной степени сложности, начиная от уравнений, выражающих прямую пропорциональную зависимость прироста от времени, и кончая, например, довольно сложным уравнением Берталанфи в модификации Ричардса.

Достаточно полный обзор таких уравнений приведен в работах Росса [221, 222], Эриксона [325], Тооминга [255] и других публикациях [17, 32, 74, 163, 229, 304, 402]. Уравнения этого типа описывают на каждом шаге времени размеры уже накопившейся биомассы, а все события, определяющие это накопление, остаются

«за кадром». В связи с этим применение таких уравнений для моделирования продукционного процесса ограничено.

Второй путь предложен Давидсоном и Филипом [324], а также Л. А. Ивановым [76] и состоит в том, что сухая масса на любом временном шаге моделируется как разница между общим фото-

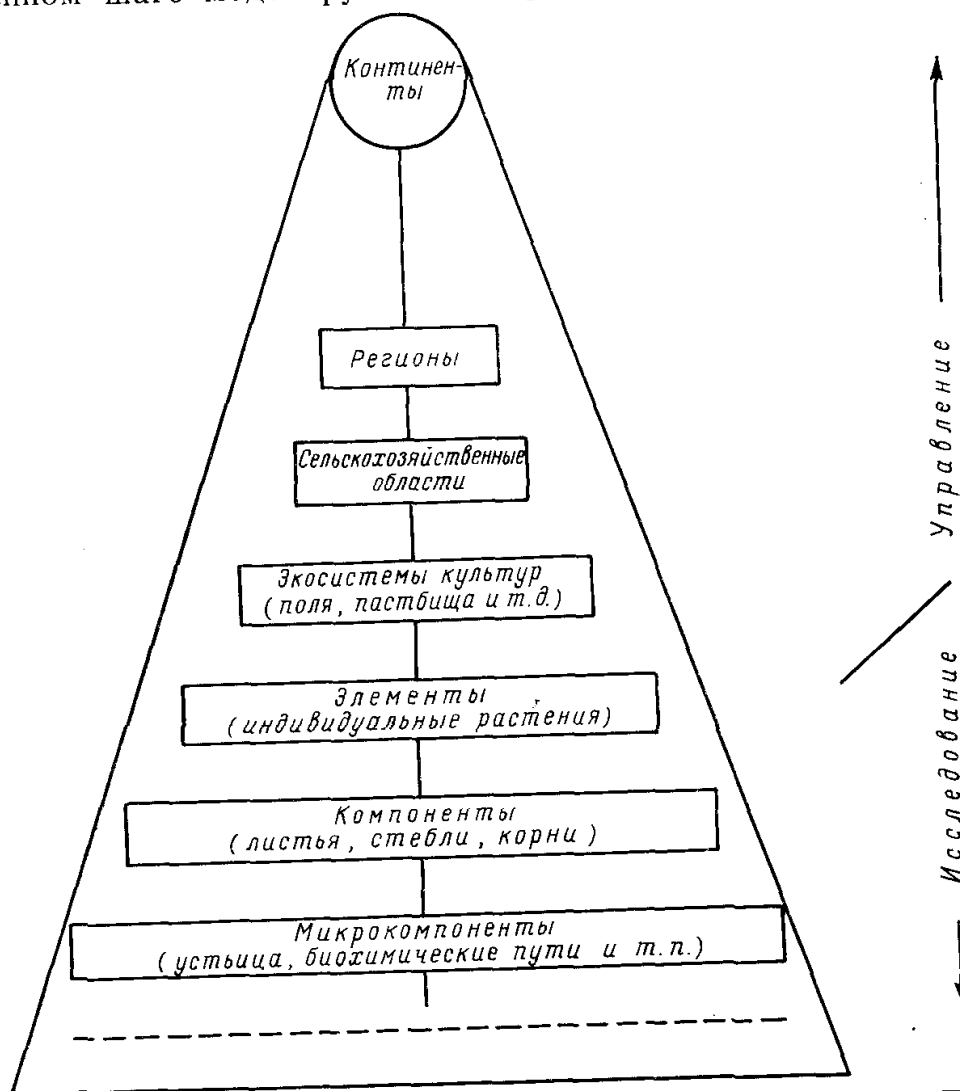


Рис. 1.1. Иерархическая схема моделей сельскохозяйственных систем. По данным [363].

синтезом и дыханием. Балансовое уравнение Иванова и Давидсона и Филипа находится в основе теоретических моделей, которые описывают продукционный процесс, состоящий из трех основных физиологических процессов: фотосинтеза, дыхания и роста [255].

1.2. Моделирование процессов фотосинтеза и дыхания

Фотосинтез является основной составляющей продукционного процесса. Во время световой фазы фотосинтеза происходит превращение световой энергии в химическую и фотолиз воды, а в пе-

риод темновой фазы углекислота восстанавливается до углеводов. Интенсивность фотосинтеза зависит от освещенности, содержания CO_2 в воздухе, температуры, водоснабжения, обеспеченности элементами минерального питания. Эти факторы, а также внутренние регулирующие факторы растения влияют на скорость протекания обеих фаз фотосинтеза.

Имеются модели фотосинтеза, описывающие процесс на уровне хлоропласта, листа (или целого растения, посева [388]). Моделирование на уровне хлоропласта представляет собой, в сущности, моделирование на молекулярном уровне биофизических и биохимических процессов, происходящих в ламеллах хлоропластов и в их строме. Такие модели [81, 113] весьма сложны, а многие их параметры трудно определимы. Они не позволяют оценить фотосинтез как элемент продукционного процесса.

Имеются два подхода к моделированию фотосинтеза на более высоких иерархических уровнях. Один из них разработан впервые Е. Рабиновичем [215], а также Монси и Сазки [364] и основан на описании зависимости скорости фотосинтеза от радиации I_Φ гиперболической формулой [364]

$$\Phi_1 = \frac{a_\Phi I_\Phi}{1 + b I_\Phi}, \quad (1.1)$$

где Φ_1 — интенсивность фотосинтеза листа, $\text{мг}/\text{CO}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$; a_Φ — наклон световой кривой фотосинтеза, $\text{мг}/\text{CO}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} / (\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2})$; a_Φ/b — плато световой кривой, $\text{мг}/\text{CO}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$.

В последствии были введены в формулу (1.1) дополнительные члены, учитывающие влияние на фотосинтез температуры и влажности почвы [20, 30, 40].

Второй подход состоит в описании влияния на фотосинтез концентрации CO_2 в центрах карбоксилирования [330], которая зависит от скорости диффузии CO_2 по пути воздух—устьица—межклеточное пространство—хлоропласты. Интенсивность фотосинтеза зависит от сопротивлений на пути диффузии CO_2 , а также от сопротивления карбоксилированию. Синтезом обоих подходов являются модели, предложенные в работах [15, 113, 317, 352]. По мнению Росса и др. [15], одной из лучших моделей газообмена CO_2 листа, отвечающей требованиям современных математических моделей продукционного процесса, является модель, предложенная в работе [352].

В этой модели [352] скорость фотосинтеза описана квадратным уравнением, в котором учтено влияние на фотосинтез концентрации CO_2 (через учет сопротивлений диффузии), радиации и температуры. Фотодыхание и темновое дыхание рассчитываются по одному уравнению. Устьичное сопротивление рассматривается как функция радиации и температуры (с использованием эмпирических коэффициентов). Приводится также вариант модели, в котором температура листа рассчитывается на основании энергетического баланса листа.

Для моделирования фотосинтеза сообщества растений используются в принципе те же подходы, что и при моделировании фотосинтеза листа, изменения касаются улавливания и использования света слоями листьев.

Дыхание — вторая составляющая балансовых уравнений прироста биомассы.

В процессе дыхания накапливается энергия в виде химических связей АТФ, обеспечивающая протекание разнообразных синтетических процессов и процессов транспорта. Кроме того, при неполном аэробном окислении глюкозы образуются разнообразные материальные субстраты, использующиеся в синтезах.

Как и фотосинтез, дыхание можно моделировать на разных уровнях, например на уровне митохондрий. Известна модель из 21 дифференциального уравнения, описывающая дыхание на этом уровне [268]. Однако при рассмотрении дыхания как элемента продукционного процесса, следует представлять дыхание как процесс расходования части усвоенной при фотосинтезе CO_2 на затраты, связанные с ростом растения и поддержанием его функций.

В ранних моделях роста дыхание, как это отмечается, например, в работе [360], принималось пропорциональным биомассе или площади листа. Однако в экспериментах было показано, что скорость общего дыхания не пропорциональна биомассе, а вполне определенно зависит от скорости фотосинтеза. На основании эмпирических данных, полученных в опытах с клевером, Маккри [359] предложил двухкомпонентную модель для описания темного дыхания целых растений:

$$R = c_G \Phi + c_m M, \quad (1.2)$$

где R — темновое дыхание целого растения, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$; Φ — фотосинтез за светлое время суток, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}$; M — сухая биомасса растения, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$; c_G — коэффициент дыхания роста, безразмерный; c_m — коэффициент дыхания поддержания, $\text{г}_{\text{с. в.}} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$.

Разделение дыхания на два компонента — дыхание роста и поддержания структур — биохимической нагрузки не несет, а означает только, что дыхание роста (компонент $c_G \Phi$ в уравнении Маккри) — это та часть дыхания, энергия которого используется для новообразования структур растений, а дыхание поддержания (компонент $c_m M$ в уравнении Маккри) связывается с поддержанием функций уже имеющихся структур.

Уравнение Маккри используется для оценки дыхания во многих динамических моделях, и применение этого уравнения вполне обосновано при шаге модели не менее суток.

В несколько иной форме (основываясь на анализе роста микробной популяции) записал связь между фотосинтезом и дыханием Торнли [388]:

$$R = (1 - Y_G) \Phi + c_m M, \quad (1.3)$$

где Y_G — количество сухого вещества (г), образовавшееся на 1 г сухого вещества субстрата.

Количественное биохимическое обоснование для оценки Y_G разработал Пеннинг де Фрис [368, 369]. На основе теоретического анализа он оценил максимальную эффективность, с которой глюкоза может превращаться в основные компоненты растительной биомассы (аминокислоты, белки, целлюлозу и т. д.). На основании этой оценки Торнли [388] записал коэффициент дыхания в виде

$$c_G = (1 - Y_G)/Y_G, \quad (1.4)$$

где c_G — коэффициент дыхания роста, $г \cdot г^{-1}$. Для высших растений Y_G изменяется в пределах 0,7—0,8, а c_G — в пределах 0,25—0,4.

Пеннинг де Фрис [370] предложил также модель, описывающую поддержание структур клеток высших растений. Модель основана на том, что энергия дыхания расходуется главным образом на реакции обмена белков и меньшее ее количество затрачивается на поддержание градиента ионов и метаболитов.

Анализ дыхания как источника энергии, проведенный на биохимическом уровне [368—370], позволил обосновать ранее предложенную де Витом и др. [399] двухкомпонентную модель дыхания, в которой дыхание роста связано со скоростью увеличения биомассы, а дыхание поддержания зависит от размеров биомассы:

$$R = c_G \frac{dM}{dt} + c_m M. \quad (1.5)$$

Следует отметить, что данная модель дыхания перспективна для использования в динамических моделях роста с шагом менее суток.

При моделировании продуктивности C_4 -растений необходимо учитывать также фотодыхание. Подходы к моделированию этого типа дыхания как функции света и температуры описаны достаточно полно в работах [113, 388].

Моделируя таким образом фотосинтез и дыхание и рассчитывая баланс, можно определить изменение сухой биомассы растения в целом. Однако при моделировании процесса формирования урожая решающее значение приобретает описание распределения ассимилятов между органами растения.

1.3. Моделирование распределения ассимилятов

Хозяйственно ценная часть урожая биомассы наиболее чувствительна к параметру распределения продуктов фотосинтеза между отдельными органами растения в онтогенезе [347, 348]. Согласно [388], речь в данном случае может идти о двух типах распределения: химическом и пространственном.

Химическое распределение ассимилированного углерода и азота между компонентами растения в моделях еще не реализовано.

Для описания пространственного распределения ассимилятов и роста в современных моделях продукционного процесса известны два подхода. Первый из них предложен впервые Россом [221, 222]. В основе этого подхода находится количественное описание роста отдельных органов растения с помощью системы уравнений вида

$$\frac{dm_j}{d\tau} = \varepsilon \sum_{i=1}^4 A_{ij} \Phi_i - \varepsilon R_j - v_j + m_p \sum_{i=1}^4 B_{ij}, \quad (1.6)$$

где i и j — органы растения; $m_p = \sum_{j=1}^4 m_j$; Φ_i и R_j — суммарный фотосинтез и дыхание j -го органа, $\text{гСО}_2 \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{раст}^{-1}$; v_j — потери сухой фитомассы j -го органа вследствие опадения, $\text{г} \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{раст}^{-1}$; A_{ij} — доля созданных за сутки в i -м органе растения «свежих» ассимилятов, оттекаемых в течение суток в j -й орган; B_{ij} — обмен старыми ассимилятами (г за сутки) между i -м и j -м органами, отнесенный к 1 г сухой фитомассы целого растения.

Параметры A_{ij} и B_{ij} представляются в виде «ростовых матриц». Если принять, что основными фотосинтезирующими органами являются листья, то вместо ростовых матриц для периода вегетативного роста используются функции роста, а для периода репродуктивного роста — функции притока—оттока. Ростовые функции отдельных органов растения являются функциями времени и характеризуют внутренние закономерности роста.

Распределение ассимилятов, основанное на использовании ростовых функций, предложенных Россом, реализовано в ряде моделей [4, 5, 236, 255] и получило дальнейшее развитие в работах Е. П. Галямина и др. [39—42].

Близким к ростовой функции репродуктивных органов в системе ростовых уравнений Росса является индекс репродукции, введенный в работе [401], определяющий долю дневной суммы ассимилятов, выделяемых для роста репродуктивных органов.

В ряде моделей [306, 315, 321, 323, 327, 342, 367, 382, 390] распределение ассимилятов основано на четко установленных в опыте соотношениях между массой отдельных органов.

Второй подход к распределению ассимилятов, который можно было бы назвать, на наш взгляд, «функциональным», основан на той предпосылке, что сухая биомасса растения состоит из двух компонентов: запасов (или фондов) свободных углеводов и структурного компонента, представленного связанными углеводами и другими органическими соединениями.

Фундаментальные теоретические работы в направлении развития этого подхода начаты де Витом и Торнли. Де Вит [398] разработал общую концептуальную модель роста растений ELCROS (*Elementary Crop Simulation*) — элементарную симуляционную модель роста культуры. Идея состоит в том, что растение (или сообщество) содержит запасы углеводных резервов, единственным источником которых является фотосинтез, пред-

ставленный в модели через скорость ассимиляции углерода. Резервы необходимы для дыхания и роста органов.

Превращение запасов в материал листа, стебля или корня выражается через скорость прироста этих органов, причем возможная скорость прироста корня определяется относительной скоростью прироста, зависящей от температуры почвы, соотношением способной и неспособной к росту части корня и запасами углеводов в надземной части. Превратившись в структурные вещества, запасы перестают играть резервную роль. В данном варианте водоснабжение и питание приняты оптимальными.

Модель ELCROS содержит несколько подмоделей оценки погоды, транспирации, скорости развития растений в зависимости от температуры и длины дня.

С использованием основных принципов модели ELCROS была разработана динамическая модель, описывающая рост культуры в течение всего вегетационного сезона — BACROS (*Basic Crop Simulator*), а также модель PHOTON, описывающая изменения основных физиологических процессов в течение одних суток [400].

Торнли [388] предлагает принципиальную модель распределения углеродного и азотного субстратов между корнем и побегом, основываясь на скорости использования одного субстрата в зависимости от другого. Для оценки скорости применяется уравнение Михаэлиса—Ментен на случай кинетики бисубстратного фермента.

Модель позволяет оценить изменение размеров сухой биомассы побега и корня, а также растения в целом. Полученные на основании модели функциональное (запасы: структура) и пространственное (доля побега в сухой биомассе растения) распределения прироста биомассы включаются в связь между скоростью чистой ассимиляции и относительной скоростью. Сделана также попытка сбалансировать модель введением стебля как источника гормонов, хотя, на наш взгляд, это не совсем удачно.

В подходе, предлагаемом Торнли, также используется концепция о наличии в растении структурных и запасных углеводов, однако распределение ассимилятов основывается на теории сопротивления транспорту.

Хотя большинство исследователей придерживается той точки зрения, что в настоящее время существует два подхода к моделированию распределения ассимилятов (и в соответствии с этим моделируют процесс распределения), в работе [346] выделены три подхода:

- 1) эмпирический, основанный на использовании эмпирических коэффициентов, определяющих, какая доля прироста всего растения приходится на тот или иной орган;

- 2) полуэмпирический, физиологически более обоснованный (подход Торнли), заключающийся в том, что рост отдельных органов зависит от концентрации субстрата в них (имеется в виду углеводный субстрат), которая, в свою очередь, зависит от пере-

носа субстрата между органами растений, определяющегося разницей концентраций и сопротивлением потоку субстрата;

3) подход, основанный на учете особенностей морфогенетического развития культуры.

В основе этого третьего подхода находится представление о зависимости использования запасов углеводов листьев и стеблей от фазы развития органа-«потребителя». Фактически рассматривается взаимодействие системы источник — сток (*source — sink*). Авторы работы [346] полагают, что данный подход к распределению использован в моделях хлопчатника и табака.

По нашему мнению, второй и третий подходы к распределению ассимилятов, изложенные в работе [346], находятся в рамках подхода, основанного на концепции фондов.

Концепция фондов пока еще в динамических моделях практически не реализована, хотя такие попытки предприняты, например, при разработке моделей формирования урожая хлопчатника [337, 358], сахарной свеклы [326] и табака [392]. О плодотворности этой концепции и необходимости ее использования при разработке моделей продуктивности говорят результаты работы [15], в которой описано распределение ассимилятов и рост растения при водном дефиците.

1.4. Длиннопериодные динамические модели продукционного процесса

В настоящее время разработано уже довольно много длиннопериодных динамических моделей различных сельскохозяйственных культур, позволяющих оценить рост растения в течение вегетационного периода как результирующую основных физиологических процессов. При построении многих длиннопериодных динамических моделей используются методология, разработанная Россом [15, 221, 222], Тоомингом [255], Торнли [388], а также сформулированные этими авторами принципы моделирования ряда физиологических процессов.

Озимые и ранние яровые зерновые культуры. Для зерновых культур наиболее полно разработана Галяминым и др. модель яровой пшеницы [41, 42]. Фотосинтез листьев, стеблей и колосьев рассматривается в модели как функция ФАР, температуры воздуха и влажности почвы. Для расчета динамики биомассы отдельных органов растений и описания процесса формирования ассимилирующей поверхности предложена соответствующая система уравнений. Распределение ассимилятов — полуэмпирическое с учетом изменения соотношения надземной и подземной биомассы в зависимости от особенностей минерального питания. Проведены численные эксперименты при различных уровнях минерального питания и увлажнения почвы.

Несколько в ином плане построена модель яровой пшеницы, разработанная в Нидерландах [374]. Рассчитывается потенциальная дневная продуктивность всего растения на единицу пло-

щади поверхности почвы в зависимости от общей потенциальной продуктивности (в стандартных условиях) с учетом сопротивлений листовой поверхности парам воды и CO_2 в реальных условиях. Затем рассчитывается накопление сухой биомассы на основании данных о продуктивности при оптимальном водоснабжении и соотношения фактической и потенциальной эвапотранспирации. Модель представляет интерес для оптимизации связей между плотностью растений в посеве, водоснабжением и продуктивностью в районах орошаемого земледелия.

В моделях ярового ячменя [4, 5] (СССР) для расчета прироста биомассы использовано балансовое уравнение; распределение ассимилятов проведено согласно Россу. Во второй из указанных моделей сделана попытка учесть в модели азотное питание. Построен довольно полный почвенный блок динамики азотистых соединений, поглощение азота регулируется исходя из принципа оптимальных доз, введена поправка на снабжение азотом в ростовые функции. Проведены численные эксперименты с моделью. Разработанная в Японии [387] модель ярового ячменя также содержит блоки фотосинтеза, дыхания и распределения ассимилятов (эмпирическое).

В предложенной Л. И. Столяровым математической модели процесса формирования урожая озимой пшеницы [61] фотосинтетическая продуктивность этой культуры рассматривается как функция ФАР, влажности почвы, температуры воздуха, концентрации CO_2 , содержания доступных форм азота, фосфора и калия. Блок распределения ассимилятов в модели не представлен. Урожай зерна определяется эмпирически по общей биомассе.

По разнице между фотосинтезом и дыханием определяется сухая биомасса в модели фотосинтетической продуктивности озимой пшеницы [45] (СССР). Распределение ассимилятов проведено на основании ростовых функций Росса.

В США разработаны две модели для озимой пшеницы [340, 373]. В первой, предназначенной для аридной зоны, скорость накопления сухой биомассы рассматривается прямо пропорциональной уже имеющейся сухой биомассе с учетом внешних факторов (температуры, влажности почвы, содержания азота в почве), введенных в виде безразмерных функций. Во второй модели ежедневное накопление сухой биомассы оценивается по разнице между общим фотосинтезом (как функции водоснабжения и солнечной радиации) и дневным и ночным дыханием (как функции длины дня и температуры).

Модели формирования урожая озимой пшеницы, озимой ржи, яровой пшеницы, ярового ячменя и овса разработаны нами и изложены в работах [88, 108, 189, 190, 192, 200, 204].

Кукуруза. В работе Галямина и др. [40] предложена динамическая модель продукционного процесса кукурузы для задач оптимизации водного режима. Для расчета биомассы кукурузы, выращиваемой на силос, предложена система уравнений, описывающих динамику биомассы надземных органов, площади листо-

вой поверхности и влагозапасов активной зоны почвы. Видимый фотосинтез рассчитан в зависимости от ФАР.

В модели роста кукурузы [321, 322] (США) описаны: фотосинтез как функция ФАР, температуры, концентрации CO_2 и площади листа; дыхание как функция скорости фотосинтеза, температуры и биомассы (отдельно для листьев, стеблей и корней); эвапотранспирация с учетом аэродинамического сопротивления и сопротивления покрова. Через эвапотранспирацию учитывается влияние влажности почвы на фотосинтез. Распределение ассимилятов — эмпирическое. Проведены численные эксперименты при разных уровнях двух параметров — интенсивности света и прироста площади листа.

В. Сплинтер (США) [380, 381] разработал модель кукурузы для конкретной местности (шт. Небраска). Накопление сухой биомассы рассчитывается в течение всего периода роста, причем, сухая биомасса, накопленная после цветения (оценивается на основании суммы температур), считается биомассой зерна. В основе модели — балансовое уравнение.

В модели кукурузы SIMACO, разработанной в Италии [355], сделана попытка распределения резервов углеводов, образующихся при фотосинтезе, между органами растения в зависимости от скорости их роста.

По группе зерновых и зернобобовых следует назвать еще модели сорго и сои.

Сорго. В модели сорго [306, 390] (США) сухая биомасса определяется по разнице между фотосинтезом и ночным дыханием. Рассчитывается потенциальный фотосинтез, как функция солнечной радиации, вводится поправка на внешние факторы (температура и влажность почвы), взятые в виде безразмерных функций. Блок развития построен на основании экспериментальных данных по накоплению сухой биомассы органов растений в зависимости от фаз развития. Распределение ассимилятов — эмпирическое. На разных сортах испытана чувствительность модели к температуре, влажности, архитектонике растительного покрова. В целом на тех же принципах разработана последняя модель сорго [341] (США).

Соя. Традиционное балансовое уравнение использовано в модели роста и развития сои [323] (США). Фотосинтез — функция эвапотранспирации (через устьичное сопротивление), интенсивности света, температуры и площади листа. Учтены фотодыхание, дыхание роста и поддержки. С помощью блока развития предсказывается дата цветения (скорость развития рассматривается как функция длины дня и дневной температуры). Распределение ассимилятов — эмпирическое. В модели сделана попытка учесть азотное питание. Предполагается, что азот не лимитирован и только доступность углеводов может ограничивать усвоение азота, все органы имеют независимые системы усвоения азота. Количество усвоенного азота контролируется соотношением сухой биомассы и азота, рассчитанным из эксперимента. Модель про-

верена для трех разных по погоде лет. Она позволяет рассчитать сухую биомассу репродуктивных органов.

В последней модели сои [393] (США) распределение ассимилятов основано на использовании концепции фондов. Авторы модели [393] ранее подробно разработали эту концепцию применительно к культуре табака [392.] Моделируется рост растений в вегетативной фазе. Органы растения (листья, стебли, корни) разделяются на три компартмента: запасной пул растворимых углеводов; молодые растущие ткани; зрелые функционирующие ткани. В виде пула углеводов накапливается энергия ФАР, трансформированная при фотосинтезе в химическую энергию. Часть энергии пула растворимых углеводов листьев используется для роста молодых листьев и дыхания. Остальная часть составляет пул растворимых углеводов стебля. В свою очередь, часть энергии пула стебля, не используемая на рост и дыхание, является источником пула корней. Таким путем описана аккумуляция растением фиксированной энергии в сухом веществе как результат главным образом процесса фотосинтетической трансформации световой энергии в химическую энергию углеродных связей и последующее распределение в соответствии с потребностями различных частей растения. Принято, что оба эти процесса регулируются уровнями азотного пула органов растения. На фотосинтез и распределение фотосинтатов оказывают влияние такие внешние условия, как минеральное питание, водоснабжение, температура, уровень ФАР. Параметры модели оценены на основании опытов в фитотроне и модель проверена для разных температурных условий.

Хлопчатник. Значительный интерес представляют модели хлопчатника, разработанные в США. Для других сельскохозяйственных культур пока еще нет столь совершенных моделей. Можно выделить две группы моделей хлопчатника.

В работе [382] описана структура модели роста, являющаяся частью общей модели продуктивности хлопчатника, разработанной автором ранее. Модель состоит из трех блоков: блок вклада деятельности человека в продуктивность, блок преобразования солнечной энергии и блок контроля и распределение фотосинтатов. Выходы блоков могут быть представлены в любых желаемых физических или экономических терминах в виде скоростей или величин. При расчете общего фотосинтеза учитывается солнечная радиация, температура воздуха, относительная влажность воздуха, потенциал почвенной влаги, концентрация CO_2 . Распределение ассимилятов по органам разработано на основании литературных данных о динамике накопления сухой биомассы.

После определения структуры блоков и системы связей для описания фотосинтеза и других процессов взяты готовые модели, использованы погодные данные и составлена программа для расчета роста растений и урожая. В целом в этой модели дана методология моделирования роста и развития хлопчатника. Практическое ее применение, по мнению авторов, позволит разработать

входную информацию для принятия решений в управлении системой продуктивности хлопчатника.

Группа исследователей (Дункан, Бакер, Хескес и др.) начиная с 1971 г. разрабатывает модели роста хлопчатника на основе балансового уравнения фотосинтеза и дыхания. В ранних вариантах модели [311, 337, 338] резервы ассимилятов не учитывались. Эффективность превращения ассимилятов в сухую биомассу рассматривалась в зависимости от дыхания. Эти модели первого поколения называют SIMCOT I.

В 1975 г. появилась более совершенная модель — SIMCOT II [357]. В этой модели развивалась теория переработки резервов углеводов и азота при генерировании запаса углерода или азота для растущего растения или органа. В этом же году авторы работы [358] усовершенствовали модель SIMCOT II. Углеводный баланс представлен трехкомпонентной системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка (скорость фотосинтеза, скорость дыхания, образование запасов), азотный баланс — уравнениями, отражающими изменения резервов азота во времени. При учете азотного обмена авторы использовали более раннюю свою модель [344], специально посвященную оценке поглощения и использования азота для роста растений.

Модель SIMCOT II входит в систему продуктивности хлопчатника, которая, согласно [320], состоит из четырех подсистем: 1) подсистемы MOIST (влажность) [319], описывающей поток влаги в почве и обеспечивающей вход в подсистему (2); 2) подсистемы EMERGE (прорастание и всходы) [391], обеспечивающей вход в подсистему (3); 3) подсистемы SIMCOT II [357]; 4) подсистемы HARVSIM, имитирующей этапы уборки хлопчатника [345].

Овощные культуры. Имеются модели роста некоторых овощных культур. В Великобритании разработаны модели салата, капусты, сахарной свеклы. В модели салата [332] накопление сухой биомассы рассматривается как функция содержания азота в надземной части. Для расчета поглощения азота в зависимости от его содержания в почве имеется блок динамики нитратов. Прирост сухой биомассы оценивается по максимально возможному приросту с учетом лимитирующих условий. Максимальный ежедневный прирост, в свою очередь, рассчитывается по логистическому уравнению как функция максимально возможного урожая. Модель использована для прогноза отзывчивости к азотным удобрениям при разных условиях. Она может быть использована для расчета урожая салата в зависимости от дозы азотных удобрений, способа их внесения, возраста растения, почвенных и погодных условий. На аналогичных принципах авторы создали и модель роста капусты [312]. Почвенный блок модели является весьма подробным и описывает не только превращения азота, но и калия.

Сахарная свекла. В ранней модели сахарной свеклы [367] накопление сухой биомассы в процессе вегетации оценивается

по балансовому уравнению, распределение фотосинтатов — по обычному аллометрическому уравнению связи между биомассой листа и общей биомассой всего растения. Фотосинтез рассчитывается по модели Мантиса, дыхание роста и поддержки рассматривается в зависимости от температуры.

Следующим шагом на пути создания моделей сахарной свеклы является модель SUBGROW, разработанная в США [326]. Хотя она получена для условий, когда снабжение водой и питательными элементами не лимитировано, распределение ассимилятов основано на принципах, изложенных де Витом, что повышает ценность модели. Модель позволяет рассчитать кривые роста сахарной свеклы в онтогенезе.

Если модели сахарной свеклы являются более общими, то применение моделей салата и капусты, видимо, стоит считать ограниченным для овощных культур именно этого типа.

Люцерна. Первая попытка построения модели роста люцерны относится к 1969 г. Модель разработана конкретно для пастбищ одной из областей Австралии [316]. Накопление сухой биомассы определяется поглощением воды из почвы и скоростью транспирации. Авторы подчеркивают, что используемые в модели связи являются аппроксимациями и применять модель следует с известной степенью осторожности.

Другая простая детерминистская модель разработана также для Австралии [329]. Используемые в модели количественные зависимости получены главным образом из экспериментов. Скорость газообмена в сообществе (на свету и в темноте) рассчитана как функция индекса листовой поверхности, общей сухой биомассы, температуры воздуха, освещения и скорости роста травостоя. Дневная продуктивность культуры рассчитывается по разнице фотосинтеза и дыхания. Распределение фотосинтатов — эмпирическое. Модель позволяет оценить потенциальное накопление сухой биомассы травостоя при различных уровнях освещения и разной температуре (вода и минеральное питание не лимитированы).

Сложнее модель роста люцерны — SIMED [362] (США). Она может рассматриваться как модель массового потока со скоростями, контролируемыми внешними и внутренними (физиологическими) условиями. Модель основана на описании следующих процессов: фотосинтез, темновое дыхание, фотодыхание, рост, распределение ассимилятов. Скорость каждого процесса выражается как доля максимальной скорости с помощью безразмерных коэффициентов. Фотосинтез — функция солнечной радиации, биомассы листа, развития, площади листа и уже имеющегося на данный момент содержания углеводов в листе; дыхание — функция биомассы листа, солнечной радиации, температуры воздуха и содержания углеводов в листе. Хотя модель рассчитана на адекватные уровни влажности почвы и удобрений, она весьма перспективна в качестве активной системы управления.

Райграс. В динамической модели роста многолетнего райграса

[378] учтены накопление ассимилятов в результате фотосинтеза, распределение ассимилятов, дыхание, отмирание тканей, перераспределение ассимилятов между стеблем и листом после дефолиации, а также ежедневно для появляющихся листьев. Под перераспределением ассимилятов понимается их распределение после укуса в новые листья, когда резервы стебля переносятся в листья для восстановления роста. Это перераспределение продолжается в течение весьма ограниченного периода времени. Кроме того, учитывается постоянное перераспределение ассимилятов из стебля в новый лист, чтобы обеспечить растяжение листа, возникающего из меристемы. Распределение ассимилятов проведено на эмпирической основе. Модель позволяет рассчитать сухую массу райграса для периодов вегетативного и репродуктивного роста.

Динамическая модель формирования злаковых трав разработана нами и описана в работе [133].

Модель урожая трав, предложенная П. И. Закржевским [72], рассматривает фотосинтез и прирост растительной массы урожая как функцию ФАР, влажности почвы, температуры воздуха и уровня минерального питания. В модели отсутствует ростовой блок и описание процесса формирования ассимилирующей поверхности.

Значительный интерес представляют модели продуктивности трав, разработанные в рамках моделей пастбищных экосистем [327, 366, 376, 394].

На принципе учета фотосинтеза и дыхания в оценке роста основаны модели сахарного тростника и подсолнечника.

Модель сахарного тростника [315] (Австралия) является в основном концептуальной. Авторы полагают, что для каждого побега следует рассчитывать фотосинтез листа с учетом старения листа, уровня освещенности, сезона и уровня питания. Необходимо также рассчитывать дыхание отдельных органов, причем стебли разделять на волокнистую и содержащую сахар часть. По разнице фотосинтеза и дыхания можно найти резервы углеводов, которые затем следует суммировать в целом для всего растения, после чего их можно снова распределить по побегам (регулятор распределения не указан), добавляя к углеводам, образующимся при фотосинтезе. Фактическая скорость фотосинтеза рассчитывается на основании максимальной скорости (получена из опыта) с поправкой на условия питания, водоснабжения и освещения. Общее дыхание рассчитывается по уравнению Маккри; распределение — эмпирическое.

В модели подсолнечника [342] (Япония) скорость накопления сухой биомассы принимается пропорциональной разности скоростей фотосинтеза и дыхания поддержки. Коэффициент пропорциональности определяется фактором дыхания роста, связанного с превращением углеводов в сухую биомассу. Общая скорость фотосинтеза рассчитывается в зависимости от интенсивности солнечной радиации, начального угла наклона световой кривой и скорости фотосинтеза при насыщении светом (последняя — функ-

ция температуры и возраста листа). Дыхание рассчитывается по уравнению Маккри; распределение ассимилятов — эмпирическое. Фотосинтез, дыхание и распределение ассимилятов моделируются в связи с возрастом растения.

Особое место среди всех перечисленных моделей, основанных на балансовом уравнении или на простом логистическом уравнении [312, 332], занимает **модель роста пшеницы**, разработанная Клаусом в ГДР [318]. Предпосылкой модели послужили представления Линзера [351] и Лаха [349, 350] о том, что в растущем растении имеется живая системная масса, осуществляющая жизненные функции, и масса, образуемая этой системной массой — «продукционная» масса. Системная масса воспроизводит сама себя и пропорциональна массе чистого белка в растении: она также катализирует синтез продукционной массы. Фактически это — разделение сухой биомассы по функциональному признаку. Между обеими массами в ходе развития растения устанавливаются определенные связи.

Принято, что в фазе всходы — кущение отношение системной и продукционной масс довольно постоянно. По достижении системной массой определенного критического значения начинается накопление продукционной массы — фаза кущения — колошение. Когда отношение масс достигает снова определенного критического значения, начинается построение системной массы генеративных органов — генеративная фаза. Когда соотношение масс в генеративных органах становится критическим, начинается синтез продукционной массы генеративных органов — фаза налива зерна.

Уравнения, связывающие эти массы, однотипны: имеется фактор пропорциональности, а влияние внешних факторов (содержание азота, влажность почвы, концентрация CO_2) вводится через функции влияния. Ассимиляционная деятельность растения рассчитывается в зависимости от содержания CO_2 в воздухе, температуры воздуха и освещения.

В первой «работающей», версии модели соотношения критических масс и их начальные значения заданы. Во второй версии модели автор попытался разработать балансовые уравнения для обмена масс в растении.

Данная модель приобрела бы большую ценность, если бы авторы смогли рассчитать «из модели» критические значения отношения масс и использовать эти значения как регулятор наступления (в модели) фаз развития растения.

Хотя в настоящее время имеются динамические модели формирования урожая почти по всем сельскохозяйственным культурам, моделирование продукционного процесса для овса и озимой ржи представлено только нашими моделями [196, 204].

До недавнего времени не разрабатывались и модели по такой важной культуре, как картофель. Впервые динамическая модель формирования урожая картофеля, учитывающая особенности этой культуры, была опубликована в работе [189], а позд-

нее появились другие модели [70, 333, 334, 375]. В работе [70] описание процесса формирования урожая картофеля основано на балансовом уравнении. Несколько по-иному построена модель, рассмотренная в работах [333, 334, 375].

Все описанные динамические модели роста сельскохозяйственных культур позволяют рассчитать накопление сухой биомассы растений в течение вегетационного периода в зависимости от метеоусловии, однако лишь в немногих из них ставится, а тем более решается, задача использования модели для практических целей. К числу таких моделей следует отнести прежде всего модели Галямина и др. [39—42] для яровой пшеницы и кукурузы, разрабатываемые для оперативного управления продукционным процессом. Модель формирования урожая ярового ячменя, предложенная Сиротенко и др. [4, 236—238], предназначена для решения ряда агрометеорологических задач.

Примером адаптации модели для определенного круга задач, в частности, для выработки стратегии управления продукционным процессом в условиях различного водоснабжения может служить работа [379], в которой рассматривались возможности трех моделей для оценки урожая по метеорологическим данным различных регионов.

Длиннопериодные динамические модели, предназначенные для использования в агрометеорологических расчетах и прогнозах, должны удовлетворять целому ряду требований (как по структуре, так и по комплексу параметров), которые до сих пор при разработке динамических моделей не формулировались. Мы полагаем, что эти требования должны состоять в следующем.

Структуру моделей необходимо разрабатывать с учетом того, чтобы она, с одной стороны, обеспечивала достаточно точное описание основных процессов жизнедеятельности (фотосинтеза, дыхания, роста) на уровне экосистем (поля), элементов (индивидуальные растения) и компонентов (органы растения). Дальнейшее углубление уровня внутрь (деятельность устьиц, функционирование биохимических структур и т. д.), как это справедливо отмечено в работе [295], необходимо лишь на стадии исследования отдельных процессов, но не в практически ориентированной модели.

С другой стороны, структура моделей должна предусматривать использование только тех параметров, для оценки которых имеются достаточно полные экспериментальные данные.

Третий важный момент, который следует подчеркнуть, говоря об адаптации моделей для прогностических целей, состоит в возможности «поднятия» модели на более высокий уровень (по сравнению с уровнем экосистемы) — на уровень «сельскохозяйственные области» и «регионы» (см. рис. 1.1). Этого можно достигнуть лишь с помощью оценки географической изменчивости параметров модели. Особенно это касается таких параметров, как ростовые функции. Разумеется, что косвенно это влияет и на структуру моделей.

Совершенно необходимым является также ограничение объема входной поступающей оперативной агрометеорологической информации.

Не менее важным является возможность оценки всех параметров моделей применительно к различным культурам и обеспеченность информацией для определения параметров.

Глава 2

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ УРОЖАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

2.1. Моделирование основных физиолого-биохимических процессов — составляющих продукционного процесса растений

Процесс формирования урожая рассматривается нами как сложная совокупность целого ряда физиологических процессов, интенсивность которых определяется не только факторами внешней среды и биологическими особенностями растений, но и взаимосвязью между самими процессами.

Зерновые культуры. Моделирование формирования урожая зерновых культур включает количественное описание процессов фотосинтеза, дыхания и роста.

При описании процесса фотосинтеза любого из фотосинтезирующих органов нами взято за основу уравнение-гипербола [364]:

$$\Phi_{0i}^j = \frac{\Phi_{\max i} a_{\Phi i} I^j}{a_{\Phi i} I^j + \Phi_{\max i}}, \quad i \in 1, s, p, \quad (2.1)$$

где Φ_{0i} — интенсивность фотосинтеза i -го органа при оптимальных условиях тепло- и влагообеспеченности и реальных условиях освещенности, $\text{мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$; $\Phi_{\max i}$ — интенсивность фотосинтеза i -го органа при световом насыщении и нормальной концентрации СО_2 , $\text{мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$; $a_{\Phi i}$ — начальный наклон световой кривой фотосинтеза, $\text{мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} / (\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2})$; I — интенсивность фотосинтетически активной радиации, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; l — листья, s — стебли, p — колосья, j — номер суток расчетного периода.

При определении интенсивности фотосинтеза колосьев значение фотосинтетически активной радиации (ФАР) принимается равным значению ФАР на верхней границе посева; в остальных случаях учитывается ФАР внутри посева.

Интенсивность фотосинтеза различна у разных органов растения [116, 290, 293]. Относительно высокой интенсивностью фотосинтеза обладают колосья. Например, в начале фазы молочной спелости интенсивность фотосинтеза элементов колоса имеет не меньшую величину, чем у листьев двух верхних ярусов и значи-

тельно бо́льшую, чем у листьев третьего сверху яруса [251]. В модели этот факт можно учесть, подбирая для каждого органа световые кривые.

Уравнение (2.1) применимо для расчета фотосинтеза в биологически оптимальных условиях среды. Для расчета фотосинтеза в реальных условиях необходимо учесть влияние внешних факторов и фазы развития растений.

Для учета влияния температуры воздуха и влажности почвы использованы функции влияния, изменяющиеся от 0 до 1.

Изменение интенсивности фотосинтеза в онтогенезе в динамических моделях продукционного процесса растений не учитывалось или учитывается через эмпирические коэффициенты. Однако из биологической литературы [246, 252] хорошо известно, что фотосинтетическая активность листьев различна на разных этапах онтогенеза отдельного листа и растения в целом.

У молодых формирующихся листьев любого яруса фотосинтетический аппарат сформирован еще неполностью и не обеспечивает высокой интенсивности фотосинтеза. Этой способностью он обладает только у зрелых функционирующих листьев. В онтогенезе целого растения наименьшей интенсивностью фотосинтеза обладают листья в фазе всходов у яровых культур и в фазе возобновления вегетации у озимых, когда анатомическая и морфологическая структура листа не обеспечивает оптимума фотосинтетической активности. Листья, которые являются фотосинтетически активными в более поздние фазы онтогенеза, отличаются структурными и физиологическими характеристиками, оптимальными для их фотосинтетической активности. Это листья среднего яруса. Такая разнокачественность листьев по ярусам определяется неодновременностью их появления и тем, что их развитие связано с развитием растения в целом.

Изменения фотосинтеза в онтогенезе учтено [108, 190] через функцию, которая описывает интенсивность фотосинтеза i -го органа в зависимости от физиологического возраста растения. Эта функция названа нами *онтогенетической кривой фотосинтеза* [190].

Тогда, для реальных условий среды, уравнение (2.1) приобретает вид

$$\Phi_{ti}^j = \Phi_{0i}^j \alpha_{\Phi}^j \psi_{\Phi}^j \gamma_{\Phi}^j, \quad (2.2)$$

где Φ_{ti} — интенсивность фотосинтеза в реальных условиях среды, $\text{мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$; α_{Φ} — онтогенетическая кривая фотосинтеза, безразмерная; ψ_{Φ} — функция влияния температуры воздуха, безразмерная; γ_{Φ} — функция влияния влажности почвы, безразмерная.

Температурная кривая фотосинтеза аппроксимирована, согласно [223], выражением

$$\psi_{\Phi}^j = 0,2 \frac{T_d^j - T_{d0}}{T_{d, \text{opt}} - T_{d0}} \left[6 - \left(\frac{T_d^j - T_{d0}}{T_{d, \text{opt}} - T_{d0}} \right) \right], \quad (2.3)$$

где T_d — средняя дневная температура воздуха, °С; T_{d0} и $T_{d, \text{opt}}$ —

соответственно пороговая и оптимальная температура воздуха для фотосинтеза, °C.

Кривая, характеризующая влияние влажности почвы на фотосинтез, аппроксимирована выражением

$$\gamma_{\Phi} = d_0 + d_1 \left(\frac{W^i}{W_{FC}} \right)^2 + d_2 \frac{W^i}{W_{FC}}, \quad (2.4)$$

где W — запасы продуктивной влаги в полуметровом слое почвы, мм; W_{FC} — наименьшая влагоемкость, мм; d_0 , d_1 и d_2 — безразмерные параметры.

Предложенный нами [204] метод определения функции α_{Φ} приводится в п. 3.2.

Функции α_{Φ} , ψ_{Φ} и γ_{Φ} , входящие в соотношение (2.2), нормированы и изменяются от 0 до 1.

Уравнение (2.2) позволяет оценить фотосинтез в расчете на единицу площади ассимилирующей поверхности за 1 ч.

В динамических моделях формирования урожая, предназначенных для решения прикладных задач, предпочтительнее рассчитывать интенсивность фотосинтеза органа на относительную площадь ассимилирующей поверхности за светлое время суток по формуле

$$\Phi_i^j = \varepsilon \Phi_{\tau i}^j L_i^j \tau_d^j, \quad (2.5)$$

где Φ_i — интенсивность фотосинтеза i -го органа, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$; ε — коэффициент для пересчета в единицы сухой массы, $\text{г} \cdot \text{мг}^{-1} \text{CO}_2$; L_i — относительная площадь ассимилирующей поверхности i -го органа, $\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$; τ_d — продолжительность светлого времени суток, ч.

Для оценки фотосинтеза посева за сутки Φ суммируются значения фотосинтеза отдельных органов:

$$\Phi^j = \sum_i^{1, s, p} \Phi_i^j. \quad (2.6)$$

Часть ассимилированного в процессе фотосинтеза углерода затрачивается на дыхание. Общепринятым при моделировании дыхания [321, 360] является подход, основанный на разделении дыхания на дыхание роста и дыхание поддержания структур.

Дыхание роста рассматривается пропорциональным фотосинтезу посева:

$$R_G^j = c_G \Phi^j; \quad (2.7)$$

где R_G — интенсивность дыхания роста, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$; c_G — коэффициент, характеризующий затраты, связанные с ростом, безразмерный.

Дыхание поддержания структур пропорционально сухой биомассе посева и зависит от температуры и возраста растения:

$$R_m^j = c_m M^j \alpha_R^j \Phi_R^j, \quad (2.8)$$

где R_m — интенсивность дыхания поддержания, $\text{г} \cdot \text{с. в} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$;

M — сухая биомасса посева, $г \cdot м^{-2}$; c_m — коэффициент дыхания поддержания, $г_{с.в.} \cdot г^{-1} \cdot сут^{-1}$; α_R — параметр, характеризующий влияние фазы онтогенеза на скорость дыхания, безразмерный; φ_R — функция влияния температуры воздуха на дыхание, безразмерная.

Учет изменения интенсивности дыхания в онтогенезе весьма существен, поскольку уровень дыхательного газообмена отражает, наряду с биохимическими особенностями протопласта, и ряд анатомо-морфологических свойств органа или ткани [225]. Биохимическая активность и структура тканей подвержена весьма сильным изменениям, связанным с возрастом и развитием растения, вследствие чего значительно меняется в онтогенезе и дыхание. Наиболее интенсивно дышат молодые, растущие ткани, при старении уровень дыхательного метаболизма падает [57, 110, 225, 257].

Вид используемой в модели продукционного процесса онтогенетической функции дыхания может быть различным и определяется, с одной стороны, подходом к расчету дыхания, а с другой, — структурой модели.

Так, при оценке дыхания на единицу сухой массы растения в целом функция имеет вид убывающей экспоненты; при оценке интенсивности дыхания на одно растение функция имеет вид одновершинной кривой; при оценке на единицу азота (величина, до некоторой степени отражающая количество активных белков) интенсивность дыхания изменяется довольно незначительно, слабо возрастая в ходе онтогенеза [225]. При описании интенсивности дыхания отдельных органов растения вид онтогенетической функции определяется не только возрастом органа, но и возрастом растения в целом и стадией его развития [225].

В принятой нами структуре модели дыхание оценивается в целом по органам (например, по всем листьям) и в этом случае функция имеет вид одновершинной кривой. Эта функция названа нами *онтогенетической кривой дыхания* [190].

Предложенный в работе [204] метод определения функции α_R излагается в п. 3.2.

Характер зависимости дыхания от температуры выражается обычно с помощью коэффициента Q_{10} . Возможны два вида температурной функции, построенной с учетом коэффициента Q_{10} .

По средним значения Q_{10} можно построить обобщающую кривую температурной зависимости дыхания. В биологическом плане построение такой кривой описано в работе [110]. В математических моделях продукционного процесса часто используется такая обобщающая кривая в виде экспоненты [15, 359, 360].

Другой вид записи температурной функции приведен в работах [321, 322] и использован нами в виде

$$\varphi_R = Q_{10}^{0,1 (T_A - T_{A0})}, \quad (2.9)$$

где Q_{10} — температурный коэффициент дыхания, безразмерный; T_A — температура воздуха, $^{\circ}C$; T_{A0} — температура, при которой берется исходное (для расчета) значение дыхания, $^{\circ}C$.

В случае если ставится задача оценки общего прироста биомассы в динамике, это можно сделать по разнице между фотосинтезом и дыханием. Однако решающее значение при моделировании процесса формирования урожая приобретает оценка прироста биомассы отдельных органов, в том числе и репродуктивных, т. е. распределение ассимилятов между органами.

Для описания скорости изменения сухой биомассы отдельных органов нами на основании предложенных Россом [221, 222] уравнений роста и с учетом модификаций [39—41, 255] принята следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta m_i^j}{\Delta t} &= \frac{\beta_i^j \Phi^j}{1 + c_{Gi}} - \frac{(\alpha_{Ri}^j c_{mi} \Phi_R^j + \vartheta_i^j) \tilde{m}_i^j}{1 + c_{Gi}}, \\ \frac{\Delta m_p^j}{\Delta t} &= \frac{\beta_p^j \Phi^j}{1 + c_{Gi}} - \frac{\left(\alpha_{Rp}^j c_{mp} \Psi_R^j \tilde{m}_p - \sum_i^{l, s, r} v_i^j \tilde{m}_i^j \right)}{1 + c_{Gi}},\end{aligned}\quad (2.10)$$

где $\Delta m_{i(p)}/\Delta t$ — скорость роста i -го вегетативного (репродуктивного) органа, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$; $\tilde{m}_{i(p)}$ — функционирующая биомасса i -го вегетативного (репродуктивного) органа, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$; β_i — ростовая функция вегетативного периода, безразмерная; v_i — ростовая функция репродуктивного периода, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; l — листья, s — стебли.

При использовании системы уравнений типа (2.10) дыхание роста и дыхание поддержания структур непосредственно не рассчитываются, а учитываются через коэффициенты α_{Ri} , c_{mi} , c_{Gi} , Φ_R .

Параметр \tilde{m} введен Галяминым [39]. Доля биомассы, оцененная через этот параметр, названа им живой биомассой. Полагаем, что более удобным для параметра \tilde{m} является понятие функционирующая биомасса, подразумевая под этим биомассу, в составе которой имеются компоненты, осуществляющие и регулирующие обмен веществ. Оценка параметра \tilde{m} проведена нами с иных позиций, чем это делает Галямин. Динамика изменения количества функционирующей биомассы определяется следующим образом.

В период активного роста вся биомасса является функционирующей, следовательно прирост общей и функционирующей биомассы одинаков:

$$\frac{\Delta \tilde{m}_i^j}{\Delta t} = \frac{\Delta m_i^j}{\Delta t} \geq 0. \quad (2.11)$$

При стрессовых условиях или естественном старении растения, когда количество общей биомассы снижается (этот момент определяется на основании модели) вследствие преобладания процессов распада над процессами синтеза, количество функционирующей биомассы определяется как доля общей биомассы:

$$-\frac{\Delta \tilde{m}_i^j}{\Delta t} = -\frac{\Delta m_i^j}{\Delta t k_{si}}, \quad (2.12)$$

где k_{si} — параметр, характеризующий долю жизнедеятельных

структур и подвижных углеводов в общей биомассе органа, безразмерный.

Распаду подвергаются жизнедеятельные структуры, которые в растении представлены практически только белками. Продукты распада белков, а также подвижные углеводы передвигаются в репродуктивные органы. Поскольку содержание белка и углеводов в органах растений известно достаточно хорошо, то и определение численного значения k_{si} не представляет затруднений.

Такой подход к оценке количества функционирующей биомассы, основанный на использовании универсального закона старения биологических систем — распада жизнедеятельных структур — предлагается нами впервые. Он позволяет по-новому описать [200] скорость изменения площади ассимилирующей поверхности органа, избежав оценки эмпирических функций *пожелтения* или *отмирания*, которые применяются в [4, 39—41, 236, 238, 255]. Нами предложено уравнение, позволяющее описать скорость изменения площади ассимилирующей поверхности i -го органа как при благоприятных условиях роста и развития растений, так и при воздействии стрессовых условий и в период старения:

$$\frac{\Delta L_i^I}{\Delta t} = \frac{\Delta \tilde{m}_i^I}{\Delta t} \frac{1}{\sigma_i}. \quad (2.13)$$

В существующих моделях формирования урожая зерновых культур прирост репродуктивного органа оценивается только в целом (стержня колоса, колосков и зерен). Биомасса зерна рассчитывается как постоянная доля биомассы колоса, а колос рассматривается как некоторая емкость, куда притекают и «свежие» и «старые» запасенные ассимилянты. Однако хорошо известно, что соотношение массы зерна и массы колоса не является постоянным.

Мы исходим из следующих положений.

Степень использования притекающих в колос ассимилятов на увеличение сухой массы зерна зависит от густоты стояния сформировавшегося в данных условиях продуктивного стеблестоя, количества колосков в колосе, зерен и присущей данному сорту массе 1000 зерен. Следовательно, скорость роста зерна является функцией количества притекающих в колос ассимилятов и максимально возможной в данных реальных условиях скорости роста зерна [108], т. е. в конечном итоге определяется взаимодействием источник — сток. В таком случае скорость роста зерна может быть описана уравнением типа Михаэлиса — Ментен [108]:

$$\frac{\Delta m_g^I}{\Delta t} = \frac{\Delta m_{g, \max}^I}{\Delta t} \frac{\Delta \tilde{m}_p^I / \Delta t}{k_g + \Delta \tilde{m}_p^I / \Delta t}, \quad (2.14)$$

где $\Delta m_g^I / \Delta t$ — скорость прироста сухой биомассы зерна, $г \cdot м^{-2} \times сут^{-1}$; $\Delta m_{g, \max}^I / \Delta t$ — максимально возможная в реальных условиях среды скорость прироста сухой биомассы зерна, $г \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$; k_g — константа Михаэлиса — Ментен, $г \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$.

Под реальными условиями в данном случае понимаются условия, создаваемые структурой стеблестоя и элементами продуктивности колоса для максимально возможных (при данном стеблестое и соотношении элементов продуктивности колоса) размеров «стока».

Для оценки максимально возможной скорости роста зерна нами предложено [108] следующее уравнение:

$$\frac{\Delta m_{g, \max}^I}{\Delta t} = \frac{2,3 b_g m_{g, \max} 10^{a_g - b_g t}}{(1 + 10^{a_g - b_g t})^2}, \quad (2.15)$$

где a_g — безразмерный параметр; b_g — параметр, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; $m_{g, \max}$ — максимально возможная масса зерна, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$.

Максимально возможная масса зерна находится по формуле

$$m_{g, \max} = 10^{-3} N_s S_p n_p n_g m_{gv}, \quad (2.16)$$

где N_s — густота стояния растений, $\text{раст} \cdot \text{м}^{-2}$; S_p — продуктивная кустистость, $\text{колос} \cdot \text{раст}^{-1}$; n_p — число колосков в колосе, $\text{колосок} \cdot \text{колос}^{-1}$; n_g — число зерен в колоске, $\text{зерно} \cdot \text{колосок}^{-1}$; m_{gv} — максимально возможная масса 1000 зерен, $\text{г} \cdot \text{зерно}^{-1}$.

Под максимально возможной массой в данном случае понимается масса зерна при сформировавшемся в данных условиях продуктивном стеблестое и элементах продуктивности колоса на единице площади и присущей данному сорту массе 1000 зерен.

Параметр k_g определяется из соотношения

$$k_g = \frac{1}{k_m} \frac{\Delta m_{g, \max}^I}{\Delta t}, \quad (2.17)$$

где k_m — безразмерный коэффициент, характеризующий угол наклона кривой, описывающей скорость роста зерна в зависимости от скорости притока ассимилятов в колос.

Картофель. Моделирование фотосинтеза, дыхания и роста отдельных органов у картофеля проведено [189, 192] на основании тех же принципов, что и у зерновых.

При этом необходимо учитывать, что картофельное растение обладает рядом биологических особенностей, отличающих картофель от зерновых культур.

Одна из главных особенностей картофеля состоит в том, что основная масса запасенных веществ материнского клубня используется растением в процессе вегетации и значительно меньшая доля расходуется в период прорастания. Таким образом, материнский клубень является дополнительным источником помимо ассимиляции CO_2 при фотосинтезе углеводов для роста растения [143, 151].

В первом приближении переток запасных веществ в органы молодого растения можно записать пропорциональным запасам питательных веществ материнского клубня [189, 192]:

$$P^I = \kappa^I M_c, \quad (2.18)$$

где P — скорость перетока углеводов из материнского клубня, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$; κ — коэффициент, характеризующий скорость перетока, сут^{-1} ; M_c — запасы питательных веществ материнского клубня, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$.

Второй особенностью растения картофеля является то, что темновая фиксация CO_2 играет довольно существенную роль в углеводном балансе. Нефотосинтетическая фиксация CO_2 свойственна не только картофелю, а практически всем растениям, и вопрос о доле ее участия в поддержании углеродного и энергетического баланса растения является спорным. Некоторые авторы [135] придают достаточно большое физиологическое значение «темновым ассимилятам» листьев. Интенсивность темновой фиксации изменяется в онтогенезе. На ранних фазах развития ночная фиксация CO_2 может составлять 15–20 % фотосинтеза в полдень. Исходя из этих соображений мы сочли целесообразным учесть гетеротрофную фиксацию CO_2 в модели картофеля.

Интенсивность гетеротрофной фиксации принимается нами [189, 192] пропорциональной фотосинтезу с учетом влияния температуры воздуха в темное время суток:

$$D^i = \varepsilon \omega^i \Phi_{\tau}^i \psi_D, \quad (2.19)$$

где D — интенсивность гетеротрофной фиксации CO_2 , $\text{г}_{\text{с.в.}} \cdot \text{дм}^{-2} \times \times \text{ч}^{-1}$; ω — безразмерный коэффициент, характеризующий соотношение фотосинтетической и темновой фиксации в онтогенезе; ψ_D — температурная кривая ночной фиксации CO_2 , величина безразмерная.

Функциональная схема описанных выше динамических моделей формирования урожая представлена на рис. 2.1. При построении диаграммы использован метод Форрестера [269]. На этой схеме приняты следующие обозначения: прямоугольники — уровни вещества; вентиляные знаки — скорости потоков вещества; эллипсы — входные параметры внешней среды; круги — внутренние параметры модели; короткие отрезки — константы; сплошные линии — потоки вещества, штриховые — потоки информации; функциональные информационные связи обозначены кружками — аргументы и стрелками — функции. Условные обозначения величин приведены в тексте.

Для представления динамической модели формирования урожая зерновых используется вся диаграмма, а для представления динамической модели формирования урожая картофеля из диаграммы следует исключить блок роста зерна.

2.2. Моделирование влияния экстремальных погодных условий на основные процессы жизнедеятельности растений

Засуха. В условиях напряженного водного режима происходит нарушение основных процессов жизнедеятельности растений. При этом динамика соотношения между фотосинтезом, дыханием и приростом биомассы может быть представлена [110] в виде следующей схемы.

Выделяются три фазы состояния растений: положительного, нулевого и отрицательного баланса органического вещества. С момента наступления засухи интенсивность процессов фотосинтеза, дыхания и прироста биомассы снижается. Надземная часть растений не в состоянии освоить образующиеся в процессе фотосинтеза углеводы. Корневая система, ориентируясь вдоль градиента влажности почвы, находится в более благоприятных условиях и может использовать углеводные излишки на освоение новых объемов почвы.

Тенденция увеличения доли подземных органов растения в условиях дефицита влаги может рассматриваться как специфическая адаптивная реакция растения, направленная на поддержание возможно высокого потенциала воды в фотосинтезирующих центрах более интенсивным снабжением подземных органов продуктами фотосинтеза [137, 300, 314, 384].

При дальнейшем усилении засухи в результате снижения интенсивности фотосинтеза и ухудшения условий для роста массообмен падает до компенсационного уровня. Такое состояние может сохраняться некоторое время, а затем продукты фотосинтеза перестают покрывать расходы на дыхание, происходит прекращение фотосинтеза — поддержание структурной целостности системы обеспечивается только за счет запасенной ранее энергии.

Будем считать, что под воздействием неблагоприятных условий в период вегетативного роста изменения характера роста надземной части растения происходят при следующих условиях:

$$\frac{\Delta M^{j+1}}{\Delta t} < \frac{\Delta M^j}{\Delta t}, \text{ если } \frac{\Delta M^{j+1}}{\Delta t} \neq 0.$$

Предположим, что прирост биомассы корней сохраняется на одном уровне или равен приросту биомассы всего растения [108]:

$$\frac{\Delta m_r^{j+1}}{\Delta t} = \begin{cases} \frac{\Delta m_r^j}{\Delta t}, & \text{если } \frac{\Delta M^{j+1}}{\Delta t} > \frac{\Delta m_r^j}{\Delta t}, \\ \frac{\Delta M^{j+1}}{\Delta t}, & \text{если } \frac{\Delta M^{j+1}}{\Delta t} < \frac{\Delta m_r^j}{\Delta t}. \end{cases} \quad (2.20)$$

Тогда прирост надземной биомассы определим из соотношения [108]

$$\frac{\Delta m_{\text{shoot}}^{j+1}}{\Delta t} = \begin{cases} \frac{\Delta M^{j+1}}{\Delta t} - \frac{\Delta m_r^{j+1}}{\Delta t}, & \text{если } \frac{\Delta m_r^{j+1}}{\Delta t} < \frac{\Delta M^{j+1}}{\Delta t}, \\ 0, & \text{если } \frac{\Delta m_r^{j+1}}{\Delta t} = \frac{\Delta M^{j+1}}{\Delta t}, \end{cases} \quad (2.21)$$

где m_{shoot} — биомасса надземных органов, г·м⁻².

Ростовые функции надземных органов растения определяются аналогично [41].

Динамика приростов общей биомассы посева рассматривается в качестве внутреннего переключателя для адаптивного увеличе-

ния доли подземных органов при воздействии на растение неблагоприятных условий.

Заморозки. Повреждение растений заморозками приводит в ряде случаев к необратимым изменениям важнейших физиологических процессов. При этом изменения, вызванные заморозком в момент самого заморозка и в период его последствий, неоднозначны. Различен характер изменения физиологических процессов при заморозках с переохлаждением, когда не происходит образования льда в тканях, и при заморозках со льдообразованием [66].

Переохлаждение во время заморозка у активно вегетирующих незакаленных растений приводит к нарушению процессов фотосинтеза и дыхания, а в последствии — к снижению продуктивности растений [249]. Заморозки с образованием льда в тканях вызывают разрушение структур фотосинтетического и дыхательного аппарата [230, 305, 356]. Впоследствии это приводит к снижению содержания хлорофилла, интенсивности фотосинтеза и дыхания и к изменениям в белковом комплексе [249]. Степень нарушения физиологических процессов зависит от интенсивности заморозка, генотипа растения, его фенотипической устойчивости и фазы онтогенеза [24, 26, 27]. Гибель растения или отдельных органов происходит только в случае образования льда в тканях.

До настоящего времени влияние заморозков в динамических моделях продукционного процесса не учитывалось.

При моделировании воздействия заморозка на фотосинтез мы основывались на следующих предпосылках. Судя по тому, что первичное воздействие заморозка состоит в нарушении структуры хлоропластов, что вызывает снижение содержания хлорофилла после заморозка, главной причиной снижения интенсивности фотосинтеза является нарушение синтеза хлорофилла. В литературе имеются данные как о снижении интенсивности фотосинтеза под влиянием заморозка [64, 95, 154, 249], так и о снижении содержания хлорофилла [154, 156, 249]. В физиологической литературе имеется достаточно полное теоретическое обоснование зависимости интенсивности фотосинтеза от содержания хлорофилла в листе [149, 216, 274]. От содержания хлорофилла зависит и начальный наклон, и плато световой кривой фотосинтеза. В работе [154] показано влияние заморозков на световую кривую фотосинтеза устойчивого и неустойчивого к заморозкам сортов картофеля.

На основе имеющихся теоретических и экспериментальных данных опишем скорость фотосинтеза сразу после заморозка следующим выражением:

$$\Phi_{0if}^i = \frac{\Phi_{\max if} a_{\Phi if} I^i}{\Phi_{\max if} + a_{\Phi if} I^i}, \quad (2.22)$$

где Φ_{0if} — скорость фотосинтеза i -го органа сразу после заморозка, $\text{мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$; $\Phi_{\max if}$ — скорость фотосинтеза i -го органа поврежденного заморозком растения при световом насыщении, $\text{мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$; $a_{\Phi if}$ — начальный наклон световой кривой фото-

синтеза i -го органа растения, поврежденного заморозком, $\text{mgCO}_2 \times \times \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} / (\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2})$.

Значения параметров $\Phi_{\max if}$ и $a_{\Phi if}$ могут быть определены двумя путями: в зависимости от уровня содержания хлорофилла или на основе световых кривых растений, подвергавшихся воздействию заморозка, если такие кривые имеются для изучаемой культуры. В первом случае значения этих параметров определяются из соотношений

$$\Phi_{\max if} = \Phi_{\max i} k_{\Phi f}, \quad (2.23)$$

$$a_{\Phi if} = a_{\Phi i} k_{af}, \quad (2.24)$$

где $k_{\Phi f}$ и k_{af} — безразмерные коэффициенты, показывающие, насколько изменяются плато и начальный наклон световой кривой фотосинтеза в зависимости от содержания хлорофилла.

Площадь ассимилирующей поверхности сразу после заморозка оценивается исходя из того, что при повреждающих заморозках, особенно в поздние фазы развития, в растении снижается содержание белков [65, 210, 247, 249], т. е. количество функционирующей биомассы. Относительная площадь ассимилирующей поверхности L_{if} на начало следующего после заморозка дня определяется из соотношения

$$L_{if}^j = L_i^{j-1} k_f, \quad (2.25)$$

где k_f — параметр, характеризующий степень повреждения растений заморозком в зависимости от его интенсивности, безразмерный.

Аналогично определяется и количество функционирующей биомассы \tilde{m}_{if} после повреждающего воздействия заморозка:

$$\tilde{m}_{if}^j = m_i^{j-1} k_f. \quad (2.26)$$

Под влиянием заморозка снижается интенсивность дыхания [248, 249].

Теоретически возможны два пути введения в модель влияния заморозков на дыхание. Учитывая, что первичной причиной снижения интенсивности дыхания после заморозка является нарушение дыхательных структур в период заморозка, степень ослабления дыхания сразу после заморозка может быть учтена как степень нарушения структур. Однако экспериментальные данные по этому вопросу весьма немногочисленны, и теория вопроса также недостаточно изучена. Поэтому мы ввели влияние заморозка на дыхание через влияние на дыхание роста и дыхание поддержания структур, которые соответственно рассчитываются с учетом изменений интенсивности фотосинтеза Φ_f после повреждающего воздействия заморозка и количества функционирующей биомассы \tilde{m}_{if} .

Скорость роста вегетативных и репродуктивных органов у растений, поврежденных заморозком, описывается системой

уравнений, аналогичной (2.10):

$$\begin{aligned}\frac{\Delta m_{if}^j}{\Delta t} &= \frac{\beta_{if}^j \Phi_f^j}{1 + c_{Gi}} - \frac{(\alpha_{Ri}^j c_{mi} \Phi_R^j + v_{if}^j) \tilde{m}_{if}^j}{1 + c_{Gi}}, \\ \frac{\Delta m_{pf}^j}{\Delta t} &= \frac{\beta_p^j \Phi_f^j}{1 + c_{Gp}} - \frac{(\alpha_{Rp}^j c_{mp} \Phi_R^j \tilde{m}_p - \sum_i^{l, s, r} v_{if}^j \tilde{m}_{if}^j)}{1 + c_{Gp}},\end{aligned}\quad (2.27)$$

где $\Delta m_{i(p)f}/\Delta t$ — скорость роста i -го вегетативного (репродуктивного) органа после воздействия заморозка, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$; v_{if} — ростовые функции периода репродуктивного роста после воздействия заморозка, $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Функции периода репродуктивного роста при повреждении растений заморозками v_{if} определим из соотношения:

$$v_{if} = k_{iuf} v_i, \quad (2.28)$$

где k_{iuf} — параметр, характеризующий изменение ростовой функции в зависимости от интенсивности заморозка, безразмерный.

Эти общие принципы моделирования фотосинтеза, дыхания и роста при воздействии заморозка во вторую половину вегетации могут быть использованы применительно к любой культуре, разумеется, при возможности подбора соответствующих параметров. Эту сторону вопроса мы считаем необходимым подчеркнуть, поскольку данные по влиянию заморозков на ход физиологических процессов довольно разрознены и немногочисленны.

Поражение растений болезнями, в частности грибными, такими, как фитофтороз и ржавчина, сопровождается значительными нарушениями основных физиологических процессов [112, 165, 226, 250] и в конечном итоге — снижением урожая.

В динамических моделях формирования урожая этот важный факт до сих пор не учитывался. Влияние грибных инфекций моделируется нами начиная с момента, когда обнаруживаются видимые признаки повреждения.

По имеющимся данным [218, 226] интенсивность фотосинтеза больных растений значительно снижается по сравнению со здоровыми. Снижение интенсивности фотосинтеза зависит от ряда факторов — фазы развития растения-хозяина, степени поражения и состояния растения при заражении. Изменения в интенсивности фотосинтеза, как правило, не проявляются в инкубационный период. Однако с появлением видимых признаков повреждения интенсивность фотосинтеза резко снижается, в ряде случаев до 32 % [218].

Основными причинами снижения интенсивности фотосинтеза следует считать снижение количества хлорофилла и нарушение хода темновых реакций фотосинтеза [112, 218]. Следовательно, при моделировании фотосинтеза влияние инфекции может быть введено через изменение угла наклона и плато световой кривой

фотосинтеза [190, 192]:

$$\Phi_{0i \text{ inf}} = \frac{\Phi_{\max i \text{ inf}} a_{\Phi i \text{ inf}} I^j}{\Phi_{\max i \text{ inf}} + a_{\Phi i \text{ inf}} I^j}, \quad (2.29)$$

где $\Phi_{0i \text{ inf}}$ — скорость фотосинтеза i -го органа пораженного растения, $\text{мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$; $\Phi_{\max i \text{ inf}}$ — скорость фотосинтеза i -го органа пораженного растения при световом насыщении, $\text{мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \times \times \text{ч}^{-1}$; $a_{\Phi i \text{ inf}}$ — начальный наклон световой кривой фотосинтеза для i -го органа пораженного растения, $\text{мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} / (\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2})$.

При этом учитывается также [190, 192], что максимум температурной кривой фотосинтеза пораженных инфекцией растений сдвигается в сторону более низких температур [109]. Тогда влияние температуры воздуха на фотосинтез больного растения можно описать выражением, аналогичным (2.3):

$$\psi_{\Phi \text{ inf}}^j = 0,2 \frac{T_d^j - T_{d0}}{T_{d \text{ opt}} - T_{d0} - \Delta T_{\text{inf}}} \left[6 - \left(\frac{T_d^j - T_{d0}}{T_{d \text{ opt}} - T_d - \Delta T_{\text{inf}}} \right)^5 \right], \quad (2.30)$$

где ΔT_{inf} — температурная поправка, учитывающая изменение уровня оптимальной для фотосинтеза температуры воздуха при поражении растения инфекцией, $^{\circ}\text{C}$.

Патогенные грибы вызывают значительные нарушения дыхательной активности растения-хозяина. Учет в модели изменений дыхания представляет значительные трудности. Они обусловлены, в частности, тем, что дыхание в ходе болезни меняется неоднозначно.

В начальный период заболевания дыхание активизируется, а в дальнейшем уровень дыхания изменяется в зависимости от степени поражения и устойчивости сорта. У неустойчивых сортов интенсивность дыхания по мере развития болезни снижается (в ряде случаев до 39 % [112]), а при сильном поражении, ведущем к отмиранию, может снизиться до нуля.

В случае если влияние болезней моделируется начиная с момента заражения, то, вероятно, следует учитывать усиление дыхания. Это теоретически можно учесть, увеличивая коэффициент дыхания роста. Обоснованием служит тот факт, что под влиянием паразита у растения-хозяина на начальных этапах заболевания активизируется синтетическая деятельность за счет усиления синтеза ферментативных белков [226], а коэффициент дыхания роста повышается с увеличением доли белкового синтеза в общих синтетических процессах растения [342].

Если влияние болезней моделируется начиная с момента, когда становятся видимыми повреждения (как это сделано нами), то в это время дыхание уже подавлено и у неустойчивых сортов оно ниже, чем у здоровых растений. Снижение интенсивности дыхания моделируется за счет снижения дыхания роста и дыхания поддержания. Дыхание больного растения R_{inf} описывается тогда следующим образом [190, 192]:

$$R_{\text{inf}} = a_{R \text{ inf}} R, \quad (2.31)$$

где $\alpha_{R \text{ inf}}$ — онтогенетическая кривая дыхания больного растения, безразмерная.

Повреждение растений болезнями приводит к уменьшению площади ассимилирующей поверхности и снижению количества функционирующей биомассы, что можно описать выражениями [190, 192]:

$$L_{i \text{ inf}}^j = L_i^{j-1} k_{\text{inf}}^j, \quad (2.32)$$

$$\tilde{m}_{i \text{ inf}}^j = m_i^{j-1} k_{\text{inf}}^j, \quad (2.33)$$

где $L_{i \text{ inf}}$ — относительная площадь ассимилирующей поверхности i -го органа больного растения, $\text{м} \cdot \text{м}^{-2}$; $\tilde{m}_{i \text{ inf}}$ — функционирующая биомасса i -го органа больного растения, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$; k_{inf} — параметр, характеризующий степень поражения растения, безразмерный.

2.3. Расчет характеристик радиационного и водно-теплого режимов посевов

Для расчета скорости фотосинтеза необходимы значения интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР) в посеве. Эта величина может быть вычислена по формуле Будаговского [224]:

$$I^j = \frac{I_0^j}{1 + c_Q L_1^j}, \quad (2.34)$$

где I_0 — интенсивность ФАР на верхней границе посева, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; c_Q — эмпирическая постоянная, безразмерная.

Поток ФАР на верхней границе посева определим по формуле

$$I_0^j = 0,5 Q^j / \tau_d, \quad (2.35)$$

где Q — суммарная радиация за сутки, $\text{Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$; τ_d — длина дня, ч.

Суммарная радиация рассчитывается по формуле Сивкова [223]:

$$Q^j = 12,66 SS^{1,31} + 315 (\sin h_n)^{2,1}, \quad (2.36)$$

где SS — продолжительность солнечного сияния за сутки, ч; h_n — полуденная высота Солнца, которая определяется по формуле

$$\sin h_n = A + B, \quad (2.37)$$

где $A = \sin \varphi \sin \delta$; $B = \cos \varphi \cos \delta$; φ — географическая широта места; δ — склонение Солнца, \dots° .

Таблица склонений Солнца для весенних и летних месяцев в работе [4] аппроксимирована полиномом

$$\begin{aligned} \delta = & [0,473 (t_0 + j) - 0,196 \cdot 10^{-2} (t_0 + j)^2 - \\ & - 0,407 \cdot 10^{-5} (t_0 + j)^3 - 0,616] \cdot 0,017453, \end{aligned} \quad (2.38)$$

где t_0 — номер суток начала расчетного периода, отсчитываемый от 20 марта; j — номер суток расчетного периода, $j = 0, 1, \dots, n$.
 Время восхода τ_v и захода τ_z Солнца определим по формулам

$$\tau_z = 12 + \frac{12}{\pi} \arccos \left(-\frac{A}{B} \right), \quad \tau_v = 24 - \tau_z. \quad (2.39)$$

Таким образом, по данным наблюдений за продолжительностью солнечного сияния можно рассчитывать суммарную радиацию по формуле (2.36), а затем определить по формулам (2.35) и (2.34) интенсивность ФАР на листе.

В случае отсутствия данных наблюдений за солнечным сиянием суммарную радиацию можно рассчитать по данным о нижней и общей облачности по формуле [14]

$$Q^j = Q_0^j [1 - 0,72n_n - 0,26(n - n_n)], \quad (2.40)$$

где Q_0 — суммарная радиация при ясном небе, Дж·см⁻²·сут⁻¹; n_n и n — количество облаков нижнего яруса и общей облачности, в долях единицы.

В формулу (2.2) для расчета фотосинтеза в реальных условиях среды входят параметры ψ_Φ и γ_Φ . Для их определения необходимы ежедневные данные о средней и дневной температуре воздуха и запасах продуктивной влаги в полуметровом слое почвы.

Среднюю за светлое время суток температуру воздуха T_d можно рассчитать по методу З. А. Мищенко [130] с помощью формулы

$$T_d^j = d_3 + d_4 T_{\max}^j, \quad (2.41)$$

где T_{\max} — максимальная температура воздуха за сутки, °С.

Изменение влагозапасов в течение декады (между сроками наблюдений) можно определить по выражению

$$W^{j+1} = W^j + \theta^j + V_w^j - E^j - U_w^j, \quad (2.42)$$

где W — запасы продуктивной влаги в полуметровом слое почвы, мм; θ — сумма осадков за сутки, мм; V_w — расход грунтовых вод в зону аэрации за сутки, мм; E — суммарное испарение за сутки, мм; U_w — инфильтрация атмосферных осадков, мм.

Расход грунтовых вод в зону аэрации рассчитывается по формуле [272]

$$V^j = E_0^j / e^{fH}, \quad (2.43)$$

где E_0 — испаряемость за сутки, рассчитываемая с помощью среднего суточного дефицита влажности воздуха d_{wA} , мм; f — безразмерный параметр, зависящий от водно-физических свойств почвы; H — глубина залегания грунтовых вод, м.

Суточные значения испарения могут быть получены по предложенной в работе [272] формуле

$$E^j = \frac{2W^j + \theta^j + V_W^j}{1 + 2W_{FC}/\eta E_0^j}, \quad (2.44)$$

где W_{FC} — наименьшая влагоемкость в полуметровом слое почвы, мм; η — безразмерный параметр, зависящий от вида и фазы развития растений.

Для расчета инфильтрации атмосферных осадков воспользуемся выражением

$$U_W^j = W^j + \theta^j - W_{FC}. \quad (2.45)$$

Уровень грунтовых вод H между сроками наблюдений, входящий в выражение (2.43), находится по формуле

$$H^{j+1} = H^j + \Delta H^j. \quad (2.46)$$

Изменение уровня грунтовых вод за сутки ΔH определяется по формулам

$$\Delta H^j = -\frac{U_W^j}{100} \frac{1}{\xi} \quad \text{при } U_W > 0, \quad (2.47)$$

$$\Delta H^j = \frac{U_W^j}{100} \frac{1}{\xi} \quad \text{при } U_W \leq 0, \quad (2.48)$$

где ξ — коэффициент водоотдачи грунтов, безразмерный.

В формулу (2.19) для расчета гетеротрофной фиксации CO_2 входит параметр ψ_D , для вычисления которого необходимы данные о средней ночной температуре воздуха.

Средняя за темное время суток температура воздуха T_n рассчитывается по формуле [130]

$$T_n^j = d_5 + d_6 T_{\min}^j, \quad (2.49)$$

где T_{\min} — минимальная за сутки температура воздуха, °С.

В связи с целевым назначением моделей формирования урожая сельскохозяйственных культур описанная выше структура моделей разрабатывалась с учетом того, чтобы эта структура, с одной стороны, обеспечивала достаточно точное описание основных процессов жизнедеятельности растений, а с другой — предусматривала использование только тех параметров, для определения которых имеются достаточно полные экспериментальные данные.

ЧАСТЬ II

Идентификация параметров и исследование моделей формирования урожая сельскохозяйственных культур

Идентификация параметров моделей продукционного процесса проводилась нами методом независимого определения параметров по результатам экспериментальных исследований. В работах [271, 331] также ставится задача независимого определения параметров моделей. Такой подход включает различные методы определения численных значений параметров: аппроксимацию эмпирических данных, интерполяцию и осреднение данных биологических исследований и непосредственное использование результатов экспериментов.

Особый интерес представляет получение ростовых функций, являющихся весьма важным звеном динамических моделей формирования урожая. На основании общебиологических представлений о закономерностях процесса мы попытались найти более общие подходы к их определению. При этом в качестве исходных материалов предполагалось использовать данные наблюдений за фенологией и состоянием сельскохозяйственных культур [200].

Применение моделей для теоретических исследований и практических расчетов требует проверки адекватности моделей, проведения исследования чувствительности моделей к параметрам, входной информации и структуре моделей.

Внутренний анализ моделей, исследование их чувствительности важны [15] с точки зрения дальнейшего усовершенствования, упрощения моделей и определения их параметров.

Исследование чувствительности моделей позволяет определить соответствие моделей еще одному требованию, которому должны удовлетворять математические модели биологических процессов. Изменение биологических параметров в пределах погрешностей, с которыми определяются эти параметры, и в пределах их индивидуальных вариаций не должно приводить к существенным изменениям решений [271].

Сравнительная оценка математических моделей продукционного процесса растений показала, что для большинства современных моделей вопрос об изучении чувствительности моделей пока еще недостаточно изучен [15].

Все параметры предложенных нами динамических моделей формирования урожая можно разделить на две группы:

- 1) параметры для расчета приростов биомассы в целом;
- 2) параметры, позволяющие рассчитывать динамику биомассы отдельных органов растения, — ростовые функции.

Глава 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИЙ ПРИРОСТА БИОМАССЫ

3.1. Параметры функций фотосинтеза и дыхания

В формулы для расчета интенсивности фотосинтеза и дыхания входят две группы параметров. Первая группа объединяет параметры световой кривой фотосинтеза Φ_{\max} и a_{Φ} , коэффициенты затрат на поддержание структуры c_m и коэффициенты затрат на конструктивное дыхание c_G .

Значения параметров Φ_{\max} и a_{Φ} уравнения (2.1) (см. гл. 2), описывающего скорость фотосинтеза как функцию плотности све-

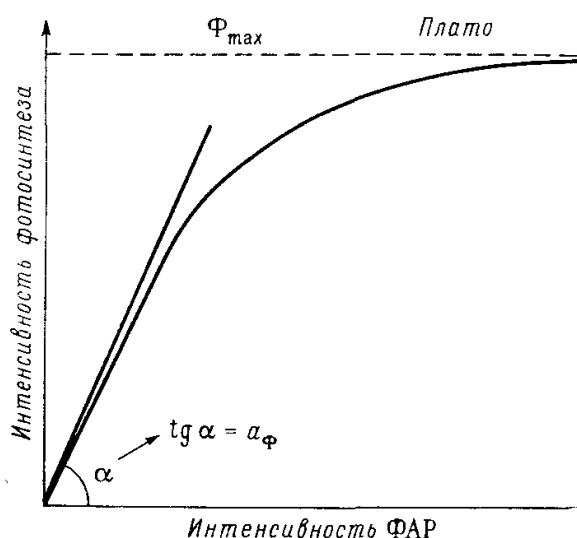


Рис. 3.1. Параметры световой кривой фотосинтеза. По данным [255].

тового потока, определены как характеристики световых кривых фотосинтеза зерновых культур и картофеля, которые приведены в работах [147, 243]. Общий вид кривой интенсивности фотосинтеза в зависимости от плотности светового потока показан на рис. 3.1. Из данных, приведенных на рис. 3.1, видно, что параметр a_{Φ} является тангенсом угла наклона световой кривой фотосинтеза при малых интенсивностях ФАР, а параметр Φ_{\max} характеризует максимальную интенсивность фотосинтеза, достигаемую при световом насыщении.

Для зерновых культур

$$\Phi_{\max} = 25 \text{ мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1},$$

а наклон световой кривой

$$a_{\Phi} = 0,833 \text{ мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} / (\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}).$$

Для культуры картофеля

$$\Phi_{\max} = 28 \text{ мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$$

и

$$a_{\Phi} = 0,430 \text{ мгСО}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} / (\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}).$$

Числовые значения параметров формулы (2.10) для расчета интенсивности дыхания, согласно [142, 255], приняты следующие: для зерновых культур

$$c_m = 0,015 \text{ г}_{\text{с.в.}} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}, \\ c_G = 0,280;$$

для картофеля

$$c_m = 0,010 \text{ г}_{\text{с.в.}} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}, \\ c_G = 0,0255.$$

Во вторую группу входят параметры, описывающие влияние условий внешней среды на скорость процессов фотосинтеза и дыхания. К ним относятся: функции влияния температуры воздуха ψ_{Φ} и влажности почвы γ_{Φ} на интенсивность фотосинтеза и температурный коэффициент дыхания φ_R .

В работе [90] приведена обобщенная температурная кривая фотосинтеза, построенная по данным [354]. Как видно из рис. 3.2 а, эта кривая хорошо описывает зависимость интенсивности фотосинтеза от температуры воздуха для различных культур. Температурная кривая фотосинтеза, приведенная на рис. 3.2 а, удовлетворительно описывается эмпирической формулой вида (2.3), предложенной в работе [223]. Эта формула используется нами при расчете интенсивности фотосинтеза в реальных условиях среды. В формуле (2.3) T_{d0} — пороговая температура, при которой еще возможен фотосинтез, $T_{d, \text{opt}}$ — оптимальная для фотосинтеза температура. Численные значения этих кардинальных точек температурной кривой фотосинтеза определялись нами по отношению к температуре светлого времени суток, когда осуществляется процесс фотосинтеза.

Следует указать на одну особенность имеющихся в литературе экспериментальных данных по влиянию температуры на интенсивность фотосинтеза. Она заключается в том, что температурные характеристики фотосинтеза получены при кратковременном (менее 1–2 ч) влиянии температуры (имеется в виду температура воздуха или листа в камере). Исходя из представлений о термическом режиме деятельной поверхности [30, 130] был осуществлен переход от температуры деятельной поверхности к средней дневной температуре воздуха. Пороговые T_{d0} и оптимальные $T_{d, \text{opt}}$ для фотосинтеза значения средней дневной температуры воздуха приняты, согласно [10, 99, 114, 134, 251], для озимой пшеницы соответственно —2 и 22 °С, для остальных культур — 0 и 22 °С.

Температурный коэффициент дыхания Q_{10} , как это следует из литературных данных [110], несколько изменяется в зависимости от фазы онтогенеза и диапазона температур. Однако указывается, что для каждого интервала температур температурный коэффициент условно может быть принят за постоянную величину.

Согласно [110], для пшеницы при значениях температуры воздуха 5—15 °С коэффициент дыхания Q_{10} (в среднем за период вегетации) равняется 2,4 (стебли) и 2,3 (листья), а при значениях температуры 15—25 °С соответственно 2,0 и 1,9.

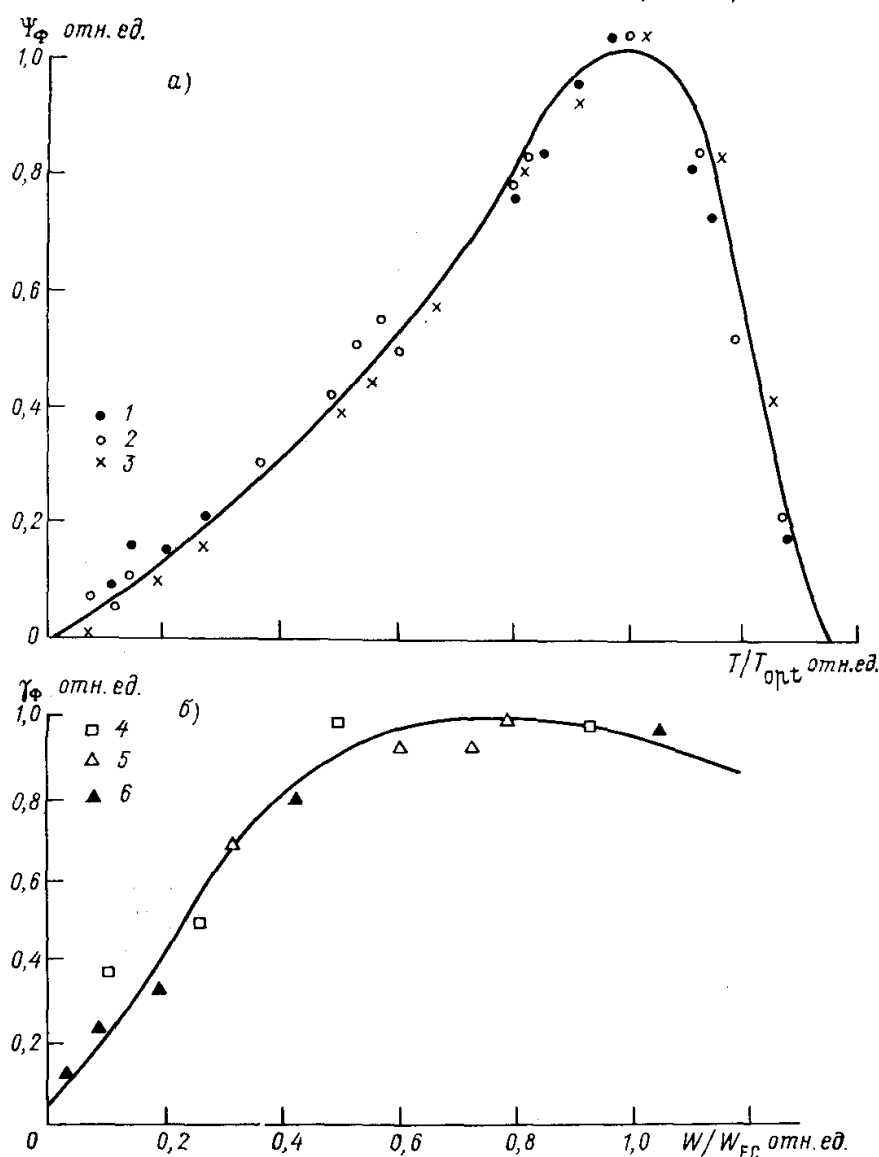


Рис. 3.2. Функции влияния температуры воздуха (а) и влажности почвы (б) на интенсивность фотосинтеза.

1 — томаты, 2 — картофель, 3 — огурцы, по данным [90]; 4 — подсолнечник, 5 — сорго, по данным [114]; 6 — кукуруза, по данным [310].

Исходя из этих данных в формуле (2.9) мы использовали следующие значения температурного коэффициента дыхания: при температуре 5—15 °С $Q_{10} = 2,35$ (для всех органов), при температуре 15—25 °С $Q_{10} = 1,95$.

Для расчета интенсивности фотосинтеза в реальных условиях среды по формуле (2.2) необходимо получить функции влияния влажности почвы на интенсивность процесса. В настоящее время нет достаточно надежных материалов, характеризующих разли-

чия в интенсивности фотосинтеза между отдельными культурами в зависимости от водного режима. По экспериментальным данным [56, 79, 114, 310] была получена обобщенная функция воздействия влажности почвы на интенсивность фотосинтеза. При ее построении опытные данные были нормированы: при оптимальном увлажнении почвы интенсивность фотосинтеза принята за единицу, при других значениях влажности почвы интенсивного фотосинтеза < 1 . Данные, характеризующие увлажнение почвы, представлены в виде отношения влажности к значениям наименьшей влагоемкости. Как видно из рис. 3.2 б, эта обобщенная функция хорошо отражает влияние влажности почвы на интенсивность фотосинтеза различных культур. Кривая на рис. 3.2 б аппроксимирована выражением в виде (2.4). Параметры этого выражения имеют следующие значения:

$$d_0 = 6,3 \cdot 10^{-2}; \quad d_1 = -159,8 \cdot 10^{-2}; \quad d_2 = 246,2 \cdot 10^{-2}.$$

Все перечисленные выше параметры характеризуют процессы, учитываемые и в модели зерновых культур, и в модели картофеля. Однако применительно к культуре картофеля необходимо оценить также параметры, характеризующие темновую фиксацию CO_2 и переток из материнского клубня.

Параметр ω в формуле (2.19) характеризует отношение темновой и фотосинтетической фиксации CO_2 в онтогенезе и является функцией времени. На основании экспериментальных данных [135], мы получили соответствующее аппроксимирующее выражение вида

$$\omega^j = \frac{0,15}{4 \cdot 10^{-3} \sum T^j + 1}, \quad (3.1)$$

где $\sum T$ — сумма активных температур выше 7°C .

Температурная кривая ночной фиксации CO_2 записана в виде выражения, аналогичного формуле (2.3). По данным [135] принято, что пороговая температура $T_{\text{но}}$ начала ночной фиксации CO_2 и оптимальная температура для протекания этого процесса $T_{\text{н. опт}}$ соответственно равны 0 и 14°C . Численные значения интенсивности темновой фиксации CO_2 в этих кардинальных точках температурной кривой определены по отношению к температуре темного времени суток, когда идет процесс темновой фиксации CO_2 , — средней ночной температуре воздуха. Вид температурной кривой принят аналогичным виду температурной кривой фотосинтеза.

Расчет перетока питательных веществ из материнского клубня и органы молодого растения ведется по формуле (2.18). В этой формуле параметр κ характеризует скорость перетока. Аппроксимирующее выражение для оценки этого параметра как функции времени получено по экспериментальным данным [143, 151]:

$$\kappa^j = \frac{0,035}{9 \cdot 10^{-3} \sum T^j + 1}. \quad (3.2)$$

Таким образом, на основании экспериментального материала определены параметры функций фотосинтеза, дыхания и перетока питательных веществ из материнского клубня.

3.2. Параметры, характеризующие онтогенетический аспект фотосинтеза и дыхания

К этой группе параметров относятся параметры, которые позволяют учесть влияние изменения физиологического возраста органов на интенсивность процессов фотосинтеза и дыхания: онтогенетические кривые фотосинтеза α_{Φ} и онтогенетические кривые дыхания α_R .

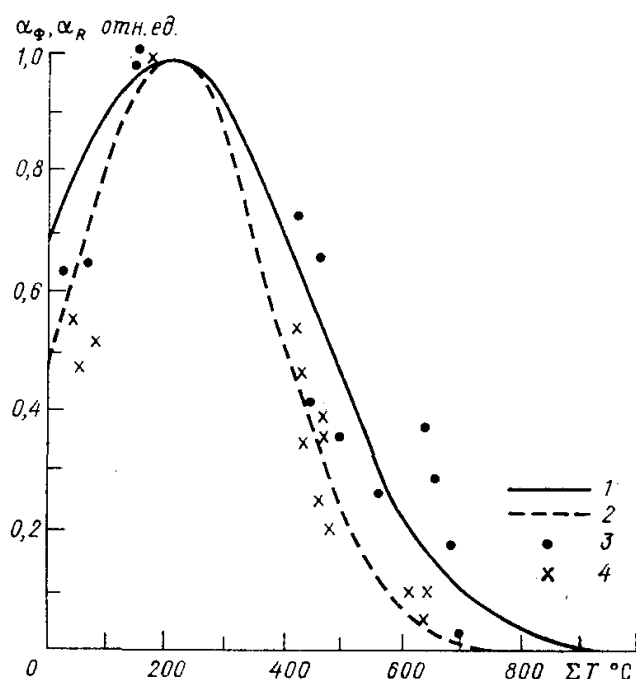


Рис. 3.3. Онтогенетические кривые фотосинтеза α_{Φ} и дыхания α_R листьев озимой пшеницы. По данным [293, 294].

1 — фотосинтез, 2 — дыхание, 3 — интенсивность фотосинтеза, 4 — интенсивность дыхания.

Общей закономерностью онтогенетической изменчивости фотосинтеза большинства сельскохозяйственных культур является сравнительно низкая интенсивность фотосинтеза у молодых, формирующихся листьев, повышение интенсивности по мере роста растения, достижение максимального уровня перед цветением и снижение в процессе старения [246].

Для зерновых культур максимальная интенсивность фотосинтеза листьев отмечается в фазе появления нижнего узла соломины, у стеблей — при колошении, а у колосьев — в период молочной спелости [290, 293]. У картофеля максимальная интенсивность фотосинтеза наблюдается в период бутонизации [86, 136, 291]. Экспериментальные данные показывают, что изменения интенсивности фотосинтеза ассимилирующих органов в онтогенезе могут характеризоваться одновершинными кривыми (рис. 3.3). Эти кривые, которые мы называем *онтогенетическими*, аппроксимированы [204] выражением вида

$$\alpha_{\Phi i}^j = \exp [-0,01 q_i (\sum T^j - \sum T_{1i})^2], \quad (3.3)$$

в котором параметр q_i находится по формуле

$$q_i = \frac{-100 \ln \alpha_{\Phi i}^0}{\sum T_{1i}}, \quad (3.4)$$

где $\alpha_{\Phi i}^0$ — характеризует начальную интенсивность фотосинтеза по отношению к максимальной; $\sum T_{1i}$ — сумма эффективных (активных) температур, накопившаяся от возобновления вегетации (всходов) до наступления фазы развития растений, в которую наблюдается максимальная интенсивность фотосинтеза i -го органа, °С.

Задавая в выражение (3.3) сумму температур за соответствующий период вегетации, можно определить онтогенетическую кривую любого из ассимилирующих органов. Для рассматриваемых культур и условий Подмоскovie эти суммы температур приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Значения параметров в формулах (3.3) и (3.4), описывающих онтогенетические кривые фотосинтеза и дыхания (°С)

Культура	Параметр кривой фотосинтеза $\sum T_1$, °С			Параметр кривой дыхания $\sum T_2$, °С			
	l	s	p	l	s	r	p
Озимая пшеница	200	420	630	120	130	130	420
Яровой ячмень	240	420	600	120	135	120	450
Овес	240	440	640	125	145	125	480
Картофель	550	—	—	110	160	160	750

Аналогичный подход использован при определении функций, описывающих возрастные изменения интенсивности дыхания отдельных органов растений (см. рис. 3.3). Сведения об изменении интенсивности дыхания в онтогенезе, на основании которых получены онтогенетические кривые дыхания, более обширны для надземных органов [290, 291, 293, 294, 296, 396] и недостаточно детальны для подземных [12, 292].

Сходный характер этих изменений позволяет принять, что онтогенетическая кривая дыхания имеет вид одновосходящей кривой с максимумом во время наиболее интенсивного роста органа. Исследования динамики накопления биомассы озимой пшеницы и картофеля, выполненные нами [174, 188] с помощью метода Горячкина—Желиговского [47, 67], показывают, что период наиболее интенсивного роста отмечается в момент времени, равный четверти периода от начала роста органа до завершения роста. За этот период накапливается сумма эффективных (активных) температур $\sum T_{2i}$.

Онтогенетические кривые дыхания отдельных органов аппроксимированы выражением, аналогичным (3.3), с подбором соответствующих параметров (см. табл. 3.1).

Такой подход к определению онтогенетических кривых фотосинтеза и дыхания принят в связи с тем, что расчет ведется для суточных значений фотосинтеза и дыхания. При определении онтогенетических кривых используется время наступления основных фаз развития сельскохозяйственных культур, которое определяется на агро- и гидрометеорологических станциях.

Это дает возможность определить параметры онтогенетических кривых в различных почвенно-климатических зонах на основе стандартной агрометеорологической информации.

3.3. Параметры формул для расчета характеристик радиационного и водно-теплового режимов посевов

Наличие большого числа расчетных схем по оценке характеристик радиационного и водно-теплового режимов посевов значительно упростило процедуру определения численных значений параметров, входящих в формулы для расчета этих характеристик. Задача их определения сводилась к выбору того или иного значения параметров из существующих расчетных схем.

Значение параметра c_Q уравнения (2.34), описывающего ослабление фотосинтетически активной радиации в посеве, согласно [224], изменяется в зависимости от высоты Солнца, вида культуры и фазы ее развития. Для приближенных расчетов значение c_Q можно принимать постоянным и равным 0,65 [224].

В формулах (2.41) и (2.49) для расчета средней за светлое и темное время суток температуры воздуха значения коэффициентов регрессии для каждого календарного месяца весенне-летнего периода получены путем обработки данных по способу, описанному в работе [130]. Данные табл. 3.2 позволяют судить об изменении значений этих коэффициентов от весенних месяцев к летним.

Таблица 3.2. Значения параметров в формулах (2.41) и (2.49)

Месяц	Формула (2.41)		Формула (2.49)	
	d_4	d_5	d_6	d_5
Апрель	0,835	—1,365	—	—
Май	0,856	—1,008	—	—
Июнь	0,891	—1,081	0,7146	5,2959
Июль	0,823	0,559	0,7788	4,7445
Август	0,873	—0,686	0,779	4,5545

Для расчетов расхода грунтовых вод в зону аэрации и суточных значений испарения необходимо знать параметры f и η . На основе приведенных в работе [272] данных числовые значения этих параметров приняты равными соответственно 1,55 и 1,10.

Значения коэффициента ξ из уравнений (2.47) и (2.48), описывающих изменение уровня грунтовых вод, согласно данным [272], для разных типов почв различны (табл. 3.3).

**Таблица 3.3. Коэффициент водоотдачи грунтов ξ .
По данным [272]**

Грунт	ξ
Суглинки	
тяжелые	0,011
средние	0,025
легкие	0,035
Супеси средние	0,06—0,08
Пески тонкозернистые и супеси легкие	0,08—0,12

Глава 4

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РОСТОВЫХ ФУНКЦИЙ

Для количественного описания роста отдельных органов растений используется система уравнений (2.10) (см. гл. 2, п. 2.1), полученная на основе представлений о фотосинтезе, дыхании и обмене ассимилятов между отдельными органами растений [221, 222]. Основу этой системы составляют матрицы вегетативного и репродуктивного роста, определяющие соответственно закономерности распределения «свежих» и перераспределения «старых» продуктов фотосинтеза между отдельными органами.

В работе [222] предложен способ приближенной оценки ростовых матриц путем перехода от них к осредненным ростовым функциям. Уравнение для описания количественного роста i -го органа записано в виде

$$\frac{\Delta m_i}{\Delta t} = \beta_i \frac{\Delta M}{\Delta t} + M v_i, \quad (4.1)$$

$$\beta_i \geq 0, \quad \sum_i \beta_i = 1,$$

$$\sum_i v_i = 0, \quad i \in 1, s, r, p.$$

Функции вегетативного роста β_i определяются, согласно (4.1), по формуле

$$\beta_i = \Delta m_i / \Delta M \quad (4.2)$$

и показывают долю суммарного прироста всего растения, приходящуюся на i -й орган.

Функции репродуктивного роста v_i , согласно (4.1), определяются как

$$v_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta t} M^{-1} \quad (4.3)$$

и показывают суммарный приток старых ассимилятов из других органов в i -й орган, если $v_i > 0$, или их отток из i -го органа в другие органы, если $v_i < 0$.

Несколько другой способ определения ростовых функций старых ассимилятов приводится в работе [39]:

$$v_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta t} m_i^{-1}, \quad \sum_i v_i m_i \equiv 0. \quad (4.4)$$

Ростовые функции определяются по приростам сухой биомассы отдельных органов растения. Экспериментально ростовые функции были определены для целого ряда культур [4, 39—41, 144, 219, 222, 255, 256]. При этом ряд авторов отмечает некоторые различия между ростовыми функциями, полученными за отдельные годы. Эти различия объясняются как влиянием особенностей погодных условий, так и погрешностями измерений. Исходя из этого в динамических моделях формирования урожайности используются осредненные за несколько лет сглаженные функции роста [4, 41].

В качестве шкалы времени функций роста в работах [4, 41] впервые предложено использовать не календарное, а «биологическое» время, определяемое суммой температур воздуха. Это несколько повысило устойчивость и сравнимость ростовых функций.

На основе обработки значительного экспериментального материала в работе [41] предлагается использовать для определения ростовых функций не приросты, а значения общей биомассы органов. Подбор соответствующих аппроксимирующих выражений для этих значений, дифференцирование аналитических выражений по времени и определение на этой основе ростовых функций представляется весьма перспективным способом.

Независимо от того, используются ли при определении ростовых функций приросты биомассы или общая биомасса растения или органа, такой подход основан на оценке большого массива экспериментальных значений биомасс или их приростов, для получения которых требуются биометрические измерения в течение нескольких лет.

Использование моделей формирования урожая в качестве основы для разработки методов оценки агрометеорологических условий произрастания и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур предполагает знание функций роста для самого широкого набора культур в различных почвенно-климатических зонах. Организация для этой цели систематических биометрических измерений на агрометеорологических станциях Госкомгидромета представляет собой чрезвычайно трудоемкую и

кропотливую задачу. Учитывая это, становится очевидным, что экспериментальное определение ростовых функций — весьма сложная задача.

Вопрос о том, возможно ли построение ростовых функций на более общей основе, опираясь на знание закономерностей индивидуального развития растений, до сих пор не исследовался. Этот вопрос интересен как с теоретической, так и практической точки зрения, поскольку позволит предложить достаточно общее математическое описание ростовых функций и использовать имеющиеся многолетние материалы наблюдений на станциях за фенологией, состоянием культур и структурой их урожая.

4.1. Функции периода вегетативного роста

Решение подобной задачи связано прежде всего с выбором метода количественного описания растения или органа в онтогенезе.

Функции роста i -го органа в вегетативный период, согласно работам Росса [222], определяются как отношения прироста биомассы i -го органа к приросту биомассы всего растения.

Приросты биомассы могут быть получены путем дифференцирования по времени уравнений, описывающих рост растения или органа. Исследования динамики накопления сухой биомассы озимой пшеницы и картофеля, проведенные на основе экспериментальных и некоторых литературных данных, а также с учетом результатов, полученных в работах [17, 82, 229, 372, 402], показали, что для описания экспериментальных данных о динамике накопления биомассы может быть использована трехпараметрическая *логистическая кривая* роста $m(t)$, которая задается формулой

$$m(t) = \frac{m^*}{1 + 10^{a-bt}} \quad (4.5)$$

и имеет следующие свойства:

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} m(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow +\infty} m(t) = m^*, \quad m(0) = \frac{m^*}{1 + 10^a};$$

кривая имеет точку перегиба при $t_n = a/b$, при котором $m(a/b) = m^*/2$; кривая симметрична относительно точки перегиба.

Анализ формулы (4.5) показывает, что параметр кривой m^* характеризует максимальную биомассу растения (органа), параметр a определяет место нахождения кривой на оси времени, а параметр b — крутизну кривой. Если логистическими кривыми описать вегетативный рост отдельных органов растения при постоянных оптимальных условиях или по многолетним данным, то кривые будут смещены относительно друг друга по оси времени в зависимости от времени появления какого-либо органа (рис. 4.1).

Семейство кривых, приведенных на рис. 4.1, описывается уравнением вида

$$m_i(t) = \frac{m_i^*}{1 + 10^{a_i - b_i(t - t_{0i})}}; \quad (4.6)$$

точка перегиба t_{pi} определяется из условия

$$a_i - b_i(t - t_{0i}) = 0,$$

Отсюда следует, что

$$t_{pi} = t_{0i} + a_i/b_i,$$

Однако параметры логистических кривых m_i^* , a_i и b_i неудобны для определения их в полевых условиях.

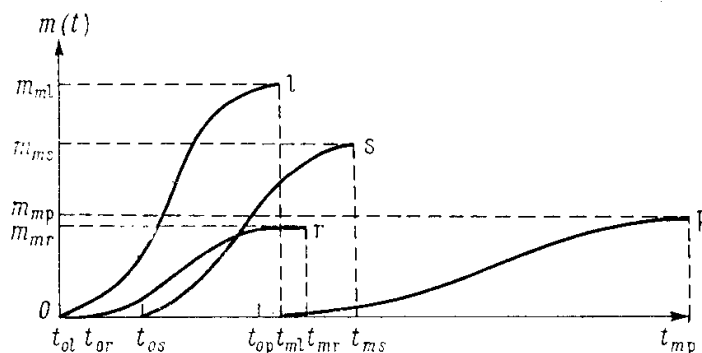


Рис. 4.1. Динамика накопления биомассы вегетативных и репродуктивных органов растения.

t_{0l} , t_{0s} , t_{0r} и t_{0p} — соответственно время начала роста листьев, стеблей, корней и репродуктивных органов; t_{ml} , t_{ms} , t_{mr} и t_{mr} — время завершения роста листьев, стеблей, корней и репродуктивных органов.

Прежде чем перейти к описанию использования семейства логистических кривых, рассмотрим вопрос об определении времени появления, начала и завершения роста каждого органа.

Исследованиями Ф. М. Куперман и др. [111] установлено, что формирование каждого органа, как и целого растения, проходит этапами. В процессе органогенеза наблюдается определенная последовательность в прохождении этапов.

Появление новых органов, изменение внешних морфологических признаков, регистрируемое как фаза развития растений, совпадает с определенными этапами органогенеза и позволяет судить о том, в каком возрастном периоде и на какой стадии развития находится растение.

Так, например, у большинства злаковых рост листьев и разворачивание листовых пластинок проходит в период от появления всходов и до VIII—IX этапов органогенеза, которым соответствует фаза колошение—цветение. На III—IV этапах органогенеза (фаза выхода в трубку) начинается рост надземной части стебля, который завершается к IX этапу (фаза цветения). Рост корней, начавшийся при прорастании зерновки, прекращается к IX—X этапам органогенеза. Формирование колоса начинается

с VII этапа (фаза появления нижнего узла соломины) и завершается на XII этапе (фаза полной спелости).

Таким образом, знание закономерностей индивидуального развития растений позволяет установить время начала и завершения роста каждого органа. Материалы фенологических наблюдений дают возможность определить эти сроки по календарю для любой почвенно-климатической зоны и выразить их в удобной для расчетов шкале времени (число дней от начала вегетации, сумма активных или эффективных температур).

В практике агрометеорологических наблюдений момент появления i -го органа растения t_{0i} определяется визуально и в это время масса i -го органа $m_i(t_0) = m_{0i} > 0$. В ходе вегетативного роста i -й орган достигает максимальной биомассы не при $t \rightarrow +\infty$, а в конечный момент времени t_{mi} — при завершении роста органа, при биомассе $m_{mi} < m_i^*$. Следует заметить, что определение момента t_{mi} несколько условно, так как не существует четкого разделения между периодами вегетативного и репродуктивного роста.

Для разработки упрощенной методики определения ростовых функций определяем момент времени t_{mi} так, чтобы интервал времени от появления i -го органа до достижения максимальной скорости роста (точка перегиба $t_{\pi} = t_{0i} + a_i/b_i$) равнялся интервалу времени $t_{mi} - t_{\pi}$, т. е.

$$t_{\pi} - t_{0i} = t_{mi} - t_{\pi}.$$

Отсюда

$$a_i/b_i = \frac{t_{mi} - t_{0i}}{2}. \quad (4.7)$$

Тогда

$$\text{при } t = t_{0i} \text{ и при } t = t_{mi}$$

получим, что

$$m_i(t_{0i}) = m_{0i} = \frac{m_i^*}{1 + 10^{a_i}}, \quad (4.8)$$

$$m_i(t_{mi}) = m_{mi} = \frac{m_i^*}{1 + 10^{a_i - b_i(t_{mi} - t_{0i})}}. \quad (4.9)$$

Выразим параметры логистических кривых m_i , a_i и b_i через новые параметры m_{0i} , m_{mi} и t_{mi} , используя соотношения (4.7), (4.8) и (4.9).

Из формулы (4.7) найдем параметр b_i :

$$b_i = \frac{2a_i}{t_{mi} - t_{0i}}.$$

Подставляя это выражение в формулу (4.9), получим

$$a_i - b_i(t_{mi} - t_{0i}) = a_i - 2a_i \frac{t_{mi} - t_{0i}}{t_{mi} - t_{0i}} = -a_i,$$

$$m_{mi} = \frac{m_i^*}{1 + 10^{-a_i}}. \quad (4.9a)$$

Разделим (4.9a) на (4.8):

$$\frac{m_{mi}}{m_{0i}} = \frac{1 + 10^{a_i}}{1 + 10^{-a_i}} = 10^{a_i}$$

и отсюда найдем, что

$$a_i = \log \frac{m_{mi}}{m_{0i}}. \quad (4.10)$$

Подставим полученное выражение (4.10) в формулу (4.8):

$$m_{0i} = \frac{m_i^*}{1 + 10^{\log \frac{m_{mi}}{m_{0i}}}} = \frac{m_i^*}{1 + m_{mi}/m_{0i}}.$$

Отсюда получим, что

$$m_i^* = m_{0i} + m_{mi}. \quad (4.11)$$

Подставим выражение (4.10) в (4.7) и найдем, что

$$b_i = \frac{2a_i}{t_{mi} - t_{0i}} = \frac{2 \log \frac{m_{mi}}{m_{0i}}}{t_{mi} - t_{0i}}. \quad (4.12)$$

Введем новые обозначения. Обозначим m_{mi}/m_{0i} через S и $t_{mi} - t_{0i}$ через P_i . Тогда выражения (4.10) и (4.12) можно записать в виде

$$a_i = \log S_i, \quad (4.10a)$$

$$b_i = \log S_i / P_i. \quad (4.12a)$$

Таким образом, соотношения (4.10a), (4.11) и (4.12a) выражают параметры a_i , b_i и m_i^* через новые параметры m_{0i} , m_{mi} и t_{mi} .

Подставим a_i , b_i и m_i^* соответственно из соотношений (4.10a), (4.11) и (4.12a) в выражение (4.6) и найдем, что

$$a_i - b_i(t - t_{0i}) = \log S_i - \frac{\log S_i}{P_i}(t - t_{0i}) = \log \left[S_i \left(1 - \frac{t - t_{0i}}{P_i} \right) \right],$$

$$m_i(t) = \frac{m_{0i} + m_{mi}}{1 + 10^{\log \left[S_i \left(1 - \frac{t - t_{0i}}{P_i} \right) \right]}}.$$

После упрощений запишем уравнение логистической кривой в окончательном виде:

$$m_i(t) = \frac{m_{0i} + m_{mi}}{1 + S_i \left(1 - \frac{t - t_{0i}}{P_i}\right)}. \quad (4.13)$$

Таким образом, логистическая кривая вегетативного роста i -го органа растения определена, если известны моменты времени появления органа t_{0i} и достижения максимальной биомассы, т. е. время прекращения роста органа t_{mi} и соответствующие биомассы m_{0i} и m_{mi} . Совершенно очевидно, что в какой-либо конкретный год в реальных погодных условиях, отличных от средних многолетних, логистическая кривая не может удовлетворительно описывать рост отдельных органов растений. Для этих целей и предложена система уравнений роста (2.10) (см. гл. 2, п. 2.1). Однако для оптимальных стабильных или средних многолетних условий согласование с экспериментом лучше. Фактические кривые роста сглаживаются и дают лучшее описание логистическими кривыми, если от физического времени перейти к биологическому, т. е. к сумме температур.

Расчет функций периода вегетативного роста в соответствии с выражением (4.2) представляет собой получение отношения прироста i -го органа к приросту всего растения. Учитывая это обстоятельство при определении ростовых функций, размеры биомассы можно рассматривать как в абсолютных величинах, так и в относительных единицах — в виде отношения части (отдельный орган) к целому (все растение).

Введем новые обозначения. Обозначим t как T (сумма температур воздуха) и t_{0i} как T_i (сумма температур, характеризующая время начала роста i -го органа). Введем также нормированные величины

$$\mu_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_i (m_{0i} + m_{mi})}, \quad (4.14)$$

$$c_i = \frac{m_{0i} + m_{mi}}{\sum_i (m_{0i} + m_{mi})}, \quad \sum_i c_i = 1, \quad i \in 1, s, r, p, \quad (4.15)$$

где $\mu_i(t)$ — биомасса i -го органа растения, выраженная в относительных единицах; c_i — параметр, характеризующий долю биомассы i -го органа в биомассе целого растения при его созревании.

Тогда уравнение логистической кривой (4.13) примет вид

$$\mu_i(t) = \frac{c_i}{1 + S_i \left(1 - \frac{T - T_i}{P_i}\right)}. \quad (4.16)$$

Уравнение (4.16) описывает изменение в онтогенезе биомассы отдельного органа в относительных единицах.

Продифференцировав выражение (4.16) по t получим уравнение скорости роста биомассы i -го органа:

$$\frac{\Delta \mu_i}{\Delta t} = \frac{c_i \ln S_i S_i \left(1 - \frac{T - T_i}{P_i}\right)}{P_i \left[S_i \left(1 - \frac{T - T_i}{P_i}\right) + 1 \right]^2} \quad (4.17)$$

Тогда функции роста i -го органа в вегетативный период могут быть записаны в следующем виде [200]:

$$\beta_i = \Delta \mu_i / \sum_i \Delta \mu_i,$$

$$\beta_i \geq 0, \quad \sum_i \beta_i = 1, \quad i \in 1, s, r, p. \quad (4.18)$$

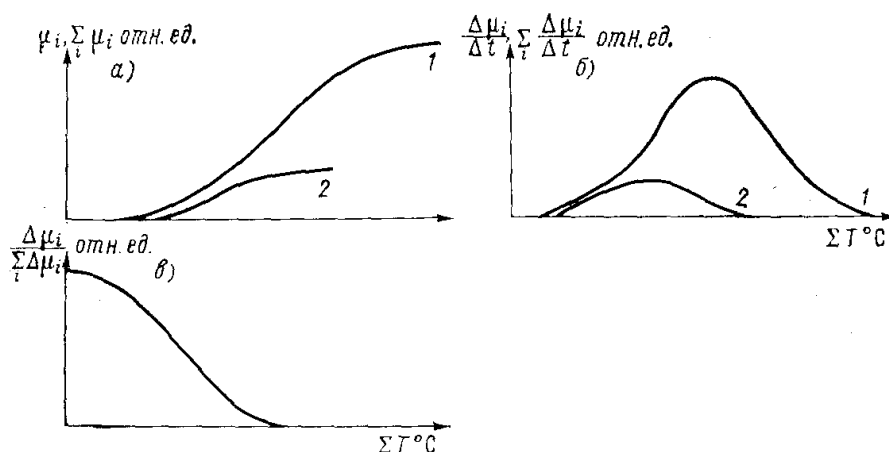


Рис. 4.2. Построение ростовой функции вегетативного периода i -го органа.

a — кривые накопления биомассы, $б$ — кривые скорости накопления биомассы, $в$ — ростовая функция i -го органа; 1 — целое растение, 2 — i -й орган.

Этот способ построения ростовых функций хорошо иллюстрирует рис. 4.2. В верхней его части (рис. 4.2 a) приведены кривые накопления биомассы i -го органа (в данном случае вегетативного) и суммы биомасс всех органов растения. Как видно из этого рисунка, время появления рассматриваемого органа совпадает с появлением всходов, а максимальные значения его биомассы достигаются к середине вегетационного периода. Отсутствие ветви кривой, описывающей уменьшение биомассы i -го органа, объясняется тем, что для вегетативных органов нами рассматривался период только до начала перетока старых ассимилятов в репродуктивные органы и опада растительной массы.

Естественно, что кривые скорости формирования биомассы i -го органа и суммы биомасс всех органов растения (см. рис. 4.2 $б$), полученные по уравнению (4.18), существенно отличаются. Эти отличия хорошо выражены как по времени достижения наибольших значений скорости накопления биомассы, так и по ее абсо-

лютым значениям. Переходя к вопросу о том, какую долю от прироста всего растения составляет прирост i -го органа в различные периоды вегетации, отметим следующее. Полученная в соответствии с уравнением (4.18) функция периода вегетативного роста i -го органа (см. рис. 4.2 в), изменяется в онтогенезе. В начальный период вегетации она сравнительно быстро достигает максимума, а затем снижается до нулевых значений, что объясняется прекращением роста i -го органа.

Различия в способах расчета ростовых функций по выражениях (4.2) и (4.18) сводятся к следующему. В первом случае [221, 222] для определения функций периода вегетативного роста используются эмпирические значения биомассы, осредненные за некоторый период лет наблюдений. При втором способе, описанном выше и предложенном нами в работе [200], время появления и прекращения роста каждого органа определяется на основе стандартных агрометеорологических наблюдений за фенологией сельскохозяйственных культур, а накопление биомассы в период между этими двумя моментами описывается логистической кривой.

4.2. Функции периода репродуктивного роста

При построении ростовых функций репродуктивного периода поиска подхода, основанного на общебиологических закономерностях жизни растения в этот период, приобретают еще большее значение, чем при оценке ростовых функций периода вегетативного роста. Помимо трудностей, связанных с получением большого объема экспериментальных данных, необходимых для расчета ростовых функций, возникает еще ряд трудностей. Они обусловлены невозможностью получения в полевых биометрических измерениях достаточно точных значений изменения биомассы во времени, поскольку эти изменения незначительны по сравнению со значениями биомассы, достигнутыми к началу репродуктивного периода.

Оценивая полученные по результатам полевых экспериментов значения ростовых функций репродуктивного периода, Галямин [41] отмечает меньшую точность их определения по сравнению с функциями периода вегетативного роста. Указывается, что полученные значения ростовых функций носят пока лишь качественный характер.

При разработке более общего подхода к описанию ростовых функций периода репродуктивного роста задача сводилась к тому, чтобы, во-первых, определить наиболее универсальный биологический процесс, характеризующий старение, и описать его количественно и, во-вторых, установить время начала старения и отмирания органа и то критическое значение, на которое снижается количество биомассы (по сравнению с достигнутым к началу периода), прежде чем она полностью отмирает [200].

Мы исходим из следующих предпосылок.

К началу цветения вегетативные органы растений достигают максимальных размеров и в этот период вся биомасса i -го органа является функционирующей, т. е. $m_i = \tilde{m}_i$. В период цветения расходы на дыхание и переток в репродуктивные органы «старых», запасенных ассимилятов компенсируются притоком «свежих» ассимилятов в i -ый орган и

$$\frac{\Delta m_i}{\Delta t} = 0.$$

После цветения, ввиду высокой аттрагирующей способности растущего репродуктивного органа, снижается поступление све-

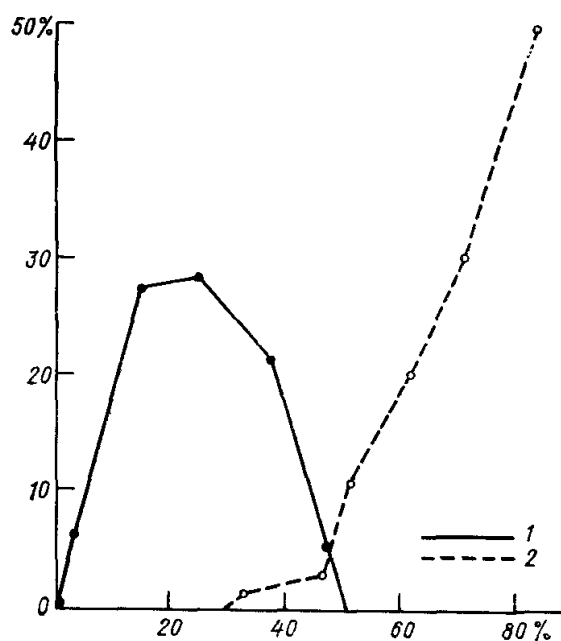


Рис. 4.3. Перемещение веществ в лист сои и из него в зависимости от стадии развития листа. По данным [115].

1 — поступление в лист, 2 — отток из листа; по оси абсцисс указан возраст листа, в процентах от окончательных размеров листа; по оси ординат — перемещившаяся радиоактивность, в процентах от введенной.

жих ассимилятов в вегетативные органы, в результате чего переток и затраты на дыхание не обеспечиваются за счет свежих ассимилятов, начинается распад жизнедеятельных структур — процесс старения вегетативных органов. При этом

$$\frac{\Delta m_i}{\Delta t} < 0.$$

Это хорошо иллюстрируют данные рис. 4.3, где показано перемещение веществ в отдельный лист в зависимости от стадии его развития [115]. На ранних стадиях (распускание листа) происходит только поступление веществ в лист, как это видно по перемещению радиоактивности из более старых листьев. Когда лист достигает своих окончательных размеров, вещества уже не поступают, а только оттекают из него. Это хорошо видно по перемещению радиоактивности из рассматриваемого листа.

По мере распада жизнедеятельных структур снижается количество функционирующей биомассы, которая составляет только часть общей биомассы, достигнутой к моменту завершения роста

органа. При отмирании органа жизнедеятельные структуры полностью распадаются и количество функционирующей биомассы снижается до нуля ($\tilde{m} = 0$).

В процессе старения продукты распада белков, а также подвижные углеводы отмершей части перетекают в репродуктивные органы. На основании этого нетрудно определить критическую величину $m_{crit i}$, на которую снижается биомасса вегетативного органа, прежде чем орган отмирает:

$$m_{crit i} = m_{max i} k_{si}, \quad i \in 1, s, r. \quad (4.19)$$

Таким образом, мы установили для репродуктивного периода время начала старения i -го органа, время отмирания органа и

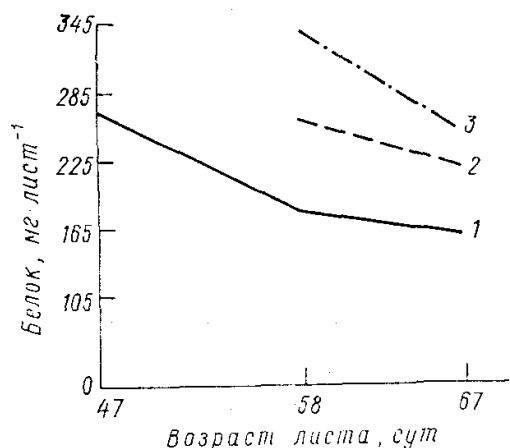


Рис. 4.4. Изменение абсолютного содержания белка в листьях фасоли. По данным [246].

1, 2, 3 — соответственно 1-, 2- и 3-й тройчатые листья

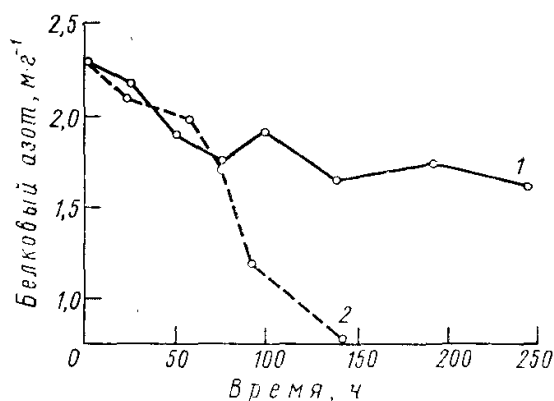


Рис. 4.5. Изменение содержания белкового азота в срезанных листьях табака на свету (1) и в темноте (2). По данным [115].

универсальный биологический процесс, характеризующий старение,— распад белков.

Математическое описание процесса убывания биомассы при старении аналогично описанию процесса распада белков, поскольку хорошо известно [246], что в онтогенезе направленность изменения биомассы листьев совпадает с направленностью изменения абсолютного содержания в них белков. На рис. 4.4 и 4.5 представлено изменение абсолютного содержания белка в листьях в онтогенезе и изменение содержания белкового азота. Из этих рисунков видно, что, хотя содержание белков в листьях изменяется в зависимости от возраста листа и условий опыта, но можно считать, что зависимость содержания белков от возраста листьев носит в целом линейный характер. Следовательно, и убывание биомассы во времени можно описать уравнением прямой. Прежде чем записать уравнение, введем следующие обозначения. Если биомассу i -го органа на момент начала старения обозначить как $m_{max i}$, то биомасса органа на момент созревания растения (т. е. при отмирании органа) будет равна:

$$m_{rip i} = m_{max i} - m_{crit i}. \quad (4.20)$$

Разделив все члены выражения (4.20) на $m_{\max i}$, получим значение $\mu_{\text{rip } i}$ в относительных единицах:

$$\mu_{\text{rip } i} = 1 - k_{si}. \quad (4.21)$$

Учитывая, что убывание биомассы i -го органа обратно пропорционально возрасту органа, процесс убывания можно представить графически в виде прямой, как это сделано на рис. 4.6.

Аналитическое выражение для описания этой зависимости имеет следующий вид:

$$\mu_i = d_i t + d_0. \quad (4.22)$$

Параметр d_i в уравнении (4.22) характеризует скорость уменьшения биомассы (в относительных единицах) вегетативного ор-

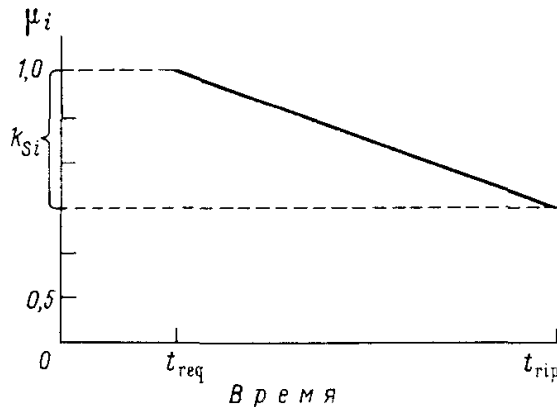


Рис. 4.6. Динамика биомассы i -го вегетативного органа (относительные единицы) в период от прекращения роста i -го органа до полного его отмирания.

гана и может быть определен как тангенс угла наклона прямой

$$\mu_i = -d_i t + d_0$$

к оси абсцисс:

$$d_i = - \frac{k_{si}}{t_{\text{rip}} - t_{\text{req } i}}, \quad (4.23)$$

где t_{rip} — время созревания растения; $t_{\text{req } i}$ — время достижения органом максимальной массы.

Значение параметра d_i определяется величиной k_{si} и двумя моментами времени: временем созревания растения и отмирания i -го органа и временем начала старения, когда рост i -го органа заканчивается.

Параметр d_i можно записать и в другом виде, продифференцировав уравнение (4.22) по t :

$$\Delta \mu_i / \Delta t = -d_i. \quad (4.24)$$

Выражение (4.23) представляет собой ростовые функции периода репродуктивного роста, которые получены путем рассмотрения динамики биомассы в относительных единицах. В работах Росса [221] и Галямина [41] определение ростовых функций основано на рассмотрении динамики абсолютных значений биомассы. Записав $d_i = v$ и выразив время в принятой в практике

агрометеорологии шкале времени, получим [200]:

$$v_i = - \frac{k_{si}}{\sum T_{rip} - \sum T_{req i}}, \quad (4.25)$$

где $\sum T_{req i}$ и $\sum T_{rip}$ — соответственно суммы температур, накопившихся за период от начала вегетации до прекращения роста i -го органа и созревания растения.

Предложенный нами способ определения ростовых функций репродуктивного периода существенно отличается от предложенных ранее [41, 221]. Для реализации подхода, изложенного в работах [41, 221], необходимы экспериментальные данные о динамике биомассы, получаемые в течение ряда лет.

Разработанный нами полуэмпирический метод [200] основан на моделировании наиболее общего процесса, характеризующего старение живых организмов, — распада жизнедеятельных структур.

4.3. Расчет площади ассимилирующей поверхности фотосинтезирующих органов

Продуктивность посевов сельскохозяйственных культур в значительной мере определяется площадью ассимилирующей поверхности растений, от которой зависит эффективность использования фотосинтетически активной радиации и в конечном счете интенсивность суммарного фотосинтеза посева. Поэтому расчет площади ассимилирующей поверхности является важным этапом при оценке их продуктивности с использованием динамических моделей формирования урожая.

В существующих динамических моделях продукционного процесса прирост площади ассимилирующей поверхности органа в первую половину вегетации рассчитывается на каждом шаге модели исходя из прироста биомассы и с учетом удельной поверхностной плотности листьев. Во вторую половину вегетации, т. е. в период старения, уменьшение площади ассимилирующей поверхности оценивается с помощью эмпирических функций, называемых функциями пожелтения или отмирания. В этом случае площадь листовой поверхности определяется по формуле [39, 255]

$$L^j = \frac{\Delta m_1^j}{\Delta t} \frac{1}{\sigma_1^j} \Delta t - v^j L^j, \quad (4.26)$$

или по формуле [4]:

$$L^j = \xi^j \frac{1}{\sigma_1^j} m_1^j, \quad (4.27)$$

где v — функция, характеризующая скорость отмирания площади ассимилирующей поверхности, согласно [39], или скорость уменьшения площади зеленых листьев, согласно [255]; ξ — функция, определяющая долю площади зеленых листьев от площади всех листьев [4].

В первую половину вегетации численное значение функции ν принимается равным 0, а ξ — 1. Расчет снижения площади ассимилирующей поверхности «включается» с момента, когда функции ν придается значение, большее нуля, а функции ξ — значение, меньшее единицы.

Время включения функций ν и ξ , а также ход изменения функций во времени определяются эмпирически.

Несколько иные подходы к описанию процесса изменения площади ассимилирующей поверхности в онтогенезе предложены в работах [52, 342]. В работе [342] процесс снижения площади ассимилирующей поверхности в период вегетации описан кривой, являющейся как бы зеркальным отображением кривой процесса нарастания площади, а в работе [52] описание пожелтения и отмирания листьев во второй половине вегетации основано на использовании сходства кривых отмирания с кривыми роста новых листьев.

В рассмотренных работах [4, 39, 52, 255, 342] параметры, необходимые для расчета площади ассимилирующей поверхности во вторую половину вегетации определяются экспериментально, так же как и функции периода репродуктивного роста [4, 39]. Такая эмпирическая основа ограничивает возможности использования методов оценки ассимилирующей поверхности, предложенных в работах [4, 39, 255], а в ряде случаев, например, при учете экстремальных воздействий, применение этих методов затруднительно.

Представляло интерес исследовать вопрос о возможности получения функций и параметров для расчета площади ассимилирующей поверхности на завершающих этапах онтогенеза, опираясь на внутренние закономерности развития в этот период. Следует отметить, что в практике динамического моделирования в таком аспекте этот вопрос до сих пор не рассматривался.

Теоретическое обоснование предлагаемого нами метода расчета площади поверхности ассимилирующих органов заключается в том, что характер биологических процессов, определяющих жизнь растения (или его отдельных органов), неодинаков в разные периоды онтогенеза. У растущих или закончивших рост функционирующих органов приток продуктов фотосинтеза обеспечивает затраты на дыхание, рост и переток в репродуктивные органы. В этом случае площадь ассимилирующей поверхности равна общей площади листьев и определяется аналогично (4.26) по выражению:

$$L_t^{i+1} = L_t^i + \frac{\Delta m_1^i}{\Delta t} \frac{1}{\sigma_1^i} \Delta t \quad \text{при} \quad \frac{\Delta m_1^i}{\Delta t} \geq 0. \quad (4.28)$$

У закончивших рост стареющих органов, в частности листьев, процессы распада преобладают над процессами синтеза, приток продуктов фотосинтеза в орган недостаточен для расходов на дыхание поддержания и переток в репродуктивные органы, дейст-

вует универсальный закон старения — распад жизнедеятельных структур. Продукты распада белков (жизнедеятельные структуры представлены только белками) и подвижные углеводы передвигаются в репродуктивные органы. Распад белков приводит к снижению количества функционирующей биомассы (представления о ней сформулированы нами ранее) и снижению площади листовой поверхности, активной в отношении фотосинтеза. В работе [115] приведены результаты исследования пожелтения стареющих листьев в связи с распадом белков. Как видно из рис. 4.7, степень пожелтения листьев связана с соответствующим снижением содержания белкового азота.

Полное отмирание функционирующей биомассы (визуально это отмечается как полное пожелтение листовой поверхности в ре-

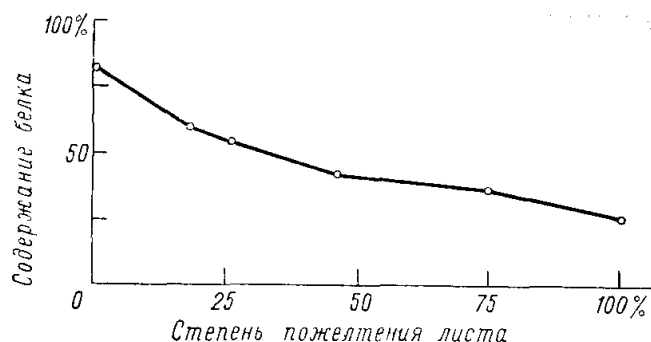


Рис. 4.7. Зависимость степени пожелтения листьев *Tropaelum* от содержания белкового азота. По данным [115].

зультате распада хлорофилл-белкового комплекса) происходит при полном распаде жизнедеятельных структур. Исходя из этих представлений процесс снижения площади ассимилирующей поверхности в период старения рассматривается на основании снижения общей биомассы органа, количества функционирующей биомассы и с учетом удельной поверхностной плотности.

Уравнение для расчета площади ассимилирующей поверхности при старении органа можно записать в следующем виде [108, 200]:

$$L_i^{j+1} = L_i^j + \frac{\Delta m_1^j}{\Delta t} \frac{1}{\sigma_1 k_{si}} \Delta t \quad \text{при} \quad \frac{\Delta m_1^j}{\Delta t} < 0. \quad (4.29)$$

Преимущества предлагаемого нами нового подхода к расчету площади ассимилирующей поверхности состоят в следующем.

1. При получении полуэмпирического уравнения (4.29) в основу положено представление об универсальной закономерности процесса старения органа как процесса распада жизнедеятельных структур и снижения количества функционирующей биомассы. В связи с этим при оценке параметров для расчета площади ассимилирующей поверхности отпадает необходимость в получении массива экспериментальных данных, которые требуются, например, для оценки функций пожелтения и отмирания [4, 39, 255].

2. Разработанный нами подход [200, 204] позволяет вполне однозначно учесть влияние экстремальных метеорологических условий (заморозки, засуха), а также повреждение болезнями. Динамика приростов биомассы i -го органа рассматривается в качестве внутреннего переключателя для «включения» предлагаемого нами метода расчета снижения функционирующей биомассы и площади ассимилирующей поверхности. В данном случае экстремальные условия и повреждения болезнями рассматриваются (в зависимости от времени действия) как факторы, ускоряющие естественное старение органа (растения), или активирующие процессы, характерные для старения.

4.4. Определение численных значений параметров ростовых функций

В приведенных выше уравнениях (4.18 и 4.25) для оценки ростовых функций β_i и v_i параметры определяются применительно к конкретной культуре. Это параметры c_i , a_i , b_i , $t_{\text{req } i}$ для функций периода вегетативного роста и k_s , $t_{\text{req } i}$, t_{rip} — для функций периода репродуктивного роста.

Параметры a_i , b_i и c_i функций периода вегетативного роста являются параметрами уравнения логистической кривой, описывающего динамику биомассы i -го органа растения в относительных единицах:

$$\mu_{it} = \frac{c_i}{1 + 10^{a_i - b_i t}}.$$

Значения параметров c_i и a_i определены путем осреднения экспериментальных данных, полученных в 1976—1979 гг. в условиях Подмосковья и литературных данных, которые относятся к озимой пшенице [293, 297], яровому ячменю [290, 297], овсу [297] и картофелю [291]. Необходимо указать, что экспериментальные данные о размерах биомассы корней весьма немногочисленны.

Числовые значения параметра c_i , характеризующего долю i -го органа в биомассе целого растения при созревании, приведены в табл. 4.1. Следует отметить, что полученные нами результаты удовлетворительно согласуются с приведенными в работе [83] данными о соотношении надземной и подземной массы и доле хозяйственно ценной части в урожае всей биомассы.

Параметр a_i определяет положение кривой относительно начала координат [153]. Этот параметр можно определить по формуле

$$\lg \left(\frac{c_i - \mu_i}{\mu_i} \right) \text{ при } t = 0.$$

Числовые значения параметра a_i для рассматриваемых культур приведены в табл. 4.1. Как следует из данных табл. 4.1, эти значения параметра a_i близки к полученным в работе [229] при

Таблица 4.1. Значения параметров функций периода вегетативного роста различных культур

Параметр	Листья	Стебли	Корни	Репродуктивные органы
Озимая пшеница				
$\frac{1}{2} \sum a_i$	1,24 (24)	1,86 (17)	1,92 (4)	1,78 (18)
$\sum r_{\text{req } i} \text{ } ^\circ\text{C}$	125	150	150	515
b_i	0,010	0,012	0,013	0,003
c_i	0,30 (24)	0,31 (17)	0,11 (4)	0,28 (18)
Яровой ячмень				
$\frac{1}{2} \sum a_i$	1,11 (19)	2,12 (17)	2,13 (5)	1,99 (17)
$\sum t_{\text{req } i} \text{ } ^\circ\text{C}$	215	265	265	590
b_i	0,005	0,008	0,008	0,003
c_i	0,28 (19)	0,28 (17)	0,11 (5)	0,33 (17)
Овес				
$\frac{1}{2} \sum a_i$	1,32 (17)	2,03 (15)	2,02 (3)	2,06 (16)
$\sum t_{\text{req } i} \text{ } ^\circ\text{C}$	240	290	290	615
b_i	0,006	0,007	0,007	0,003
c_i	0,28 (17)	0,28 (15)	0,15 (3)	0,29 (16)
Картофель				
$\frac{1}{2} \sum a_i$	1,43 (20)	2,24 (17)	2,17 (4)	2,19 (18)
$\sum t_{\text{req } i} \text{ } ^\circ\text{C}$	225	400	325	450
b_i	0,006	0,006	0,007	0,005
c_i	0,20 (20)	0,26 (17)	0,03 (4)	0,51 (18)

Примечание. В скобках указано число случаев осреднения.

количественном описании динамики биомассы гороха, ячменя, овса и льна.

При оценке параметра b_i использованы некоторые особенности принятой для описания динамики биомассы i -го органа логистической кривой вида (4.6), в частности, то, что кривая симметрична относительно точки перегиба.

Точка перегиба имеет место при

$$a_i - b_i t = 0. \quad (4.30)$$

С учетом (4.30) временную координату точки перегиба t можно определить из соотношения

$$t = a_i / b_i. \quad (4.31)$$

Поскольку логистическая кривая симметрична относительно точки перегиба, то параметр t в выражении (4.31) представляет собой время, равное половине всего периода роста i -го органа. Если временная шкала принята в суммах эффективных (активных) температур, то параметр t будет равен половине суммы эффективных (активных) температур $\sum T_{\text{req } i}$, необходимой для завершения роста i -го органа.

Исходя из этого параметр b_i приближенно можно определить по формуле

$$b_i = \frac{a_i}{^{1/2} \sum T_{\text{req } i}}. \quad (4.32)$$

Завершение роста листьев, стеблей, корней и репродуктивных органов зерновых культур и картофеля характеризуют суммы эффективных (активных) температур, накопившиеся за периоды всходы—колошение (выметывание, бутонизация) всходы—цветение, колошение (выметывание, бутонизация)—восковая спелость (увядание ботвы). Определив по справочникам «Агроклиматические ресурсы области» необходимые суммы эффективных (активных) температур, по выражению (4.32) находят значения параметра b_i применительно к условиям данной территории. Значения параметра b_i приведены в табл. 4.1. В качестве исходных за указанные выше периоды взяты суммы эффективных температур выше 5°C для зерновых культур и суммы активных температур выше 7°C для картофеля в условиях Подмосковья.

Оценка функций периода репродуктивного роста основана на использовании предложенного в работах [200, 204] выражения:

$$v_i = - \frac{k_{si}}{\sum T_{\text{rip}} - \sum T_{\text{req } i}}.$$

В этом выражении параметр k_{si} характеризует предельное снижение биомассы i -го вегетативного органа при его старении вследствие распада белковых структур и перетока продуктов распада и подвижных углеводов из вегетативных органов в репродуктивные. Содержание белков и углеводов в различных органах растений (имеются в виду органы, закончившие рост) вполне определено в данных конкретных условиях среды. Согласно данным, приведенным в работе [246], содержание (% сухой массы) белков в листьях пшеницы колеблется от 15 до 27 %, углеводов — от 18 до 29 %.

Эти данные хорошо согласуются с результатами полевых исследований по изучению оттока сухого вещества из вегетативных органов во время налива зерна у различных сортов яровой пшеницы [101]. Как видно из данных, приведенных в табл. 4.2, уменьшение сухой массы листовых пластинок и влагалища листа по отношению к максимальной колеблется от 17 до 54 %, соломины — от 21 до 48 %.

Исходя из этого параметр k_s принимался равным 0,3.

В выражении (4.25) параметры $\sum T_{\text{rip}}$ и $\sum T_{\text{req } i}$ представляют собой соответственно суммы эффективных (активных) температур, накопившихся за период вегетации растения (всходы—восковая спелость у зерновых культур, всходы—увядание ботвы у картофеля) и суммы эффективных (активных) температур, необходимые для завершения роста i -го органа.

Таблица 4.2. Отток сухого вещества из вегетативных органов яровой пшеницы во время налива зерна в зависимости от густоты посева. По данным [101]

Сорт	Число высеянных зерен на погонной длине 1 м	Листовые пластинки		Влагалища листьев		Соломина	
		г на 10 растений	% максимальной массы	г на 10 растений	% максимальной массы	г на 10 растений	% максимальной массы
Лютесценс 062	10	3,38	48,5	1,18	22,6	4,04	21,7
	50	2,15	53,8	1,68	41,3	4,46	31,6
	150	0,99	53,5	0,91	52,6	2,66	48,3
Гарнет	10	1,44	38,0	0,69	17,3	3,29	24,1
	50	0,89	39,5	0,61	26,0	1,81	23,9
	150	0,69	51,4	0,68	50,0	1,21	39,0

Таблица 4.3. Значения функций периода репродуктивного роста v ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Культура, сорт	$v_l \times 10^4$	$v_s \times 10^4$	$v_r \times 10^4$
Озимая пшеница, Мироновская 808	—2,7	—3,6	—2,6
Яровой ячмень, Московский 121	—3,5	—4,7	—3,4
Овес, Львовский 78	—3,4	—4,4	—3,2
Картофель, Детскосельский	—4,0	—5,1	—3,9

Вычисление $\sum T_{\text{гр}}$ производится аналогично расчету $\sum T_{\text{req } i}$ по опубликованным в справочниках «Агроклиматические ресурсы области» данным.

Числовые значения функций периода репродуктивного роста приведены в табл. 4.3. Они получены для условий Подмосковья.

4.5. Проверка ростовых функций

При разработке предложенных нами методов определения ростовых функций, описания динамики площади ассимилирующей поверхности сделан ряд допущений и упрощающих предположений. Их справедливость, а также точность разработанных методов можно оценить, сравнивая результаты расчетов по модели с экспериментальными данными.

Для сравнения были использованы результаты проведенных в 1976—1979 гг. в условиях Подмосковья полевых опытов. В схемах опытов было предусмотрено ежедекадное определение прироста функционирующей и общей сухой биомассы вегетативных и репродуктивных органов и площади ассимилирующей поверхности.

Рассмотрим соответствие функций периода вегетативного роста, рассчитанных по предложенному нами методу, ростовым функциям, полученным экспериментально по методу Росса [221, 222] на основании данных полевых опытов. На рис. 4.8—4.11 представлены функции для озимой пшеницы, ярового ячменя,

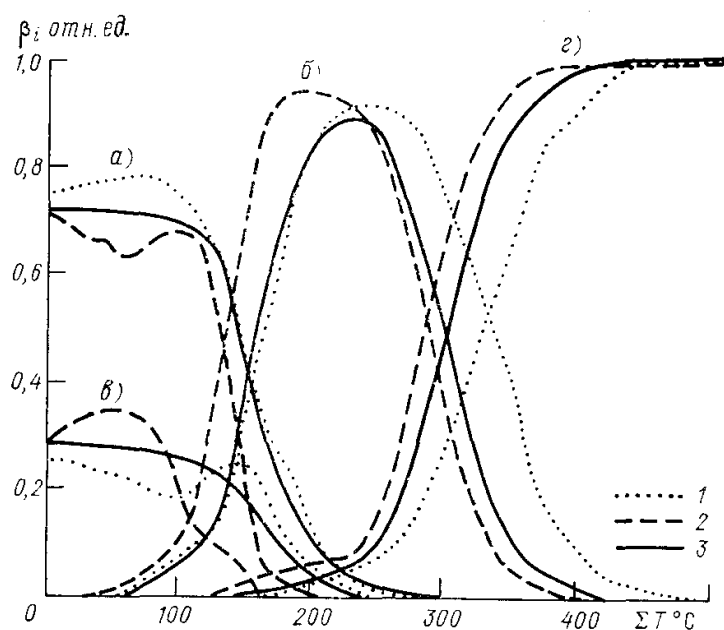


Рис. 4.8. Функции роста отдельных органов озимой пшеницы (сорт Мироновская 808), полученные экспериментально. Подмосковье.

Группы кривых: а — листья, б — стебли, в — корни, г — репродуктивные органы; 1 — 1977 г., 2 — 1978 г., 3 — 1979 г.

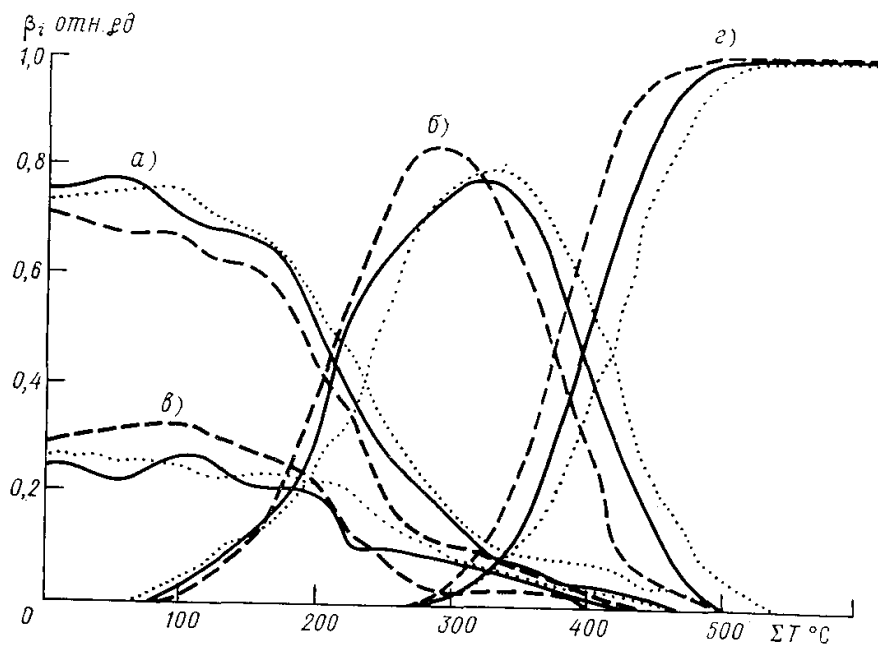


Рис. 4.9. Функции роста отдельных органов ярового ячменя (сорт Московский 121), полученные экспериментально. Подмосковье.

Усл. обозначения см. рис. 4.8.

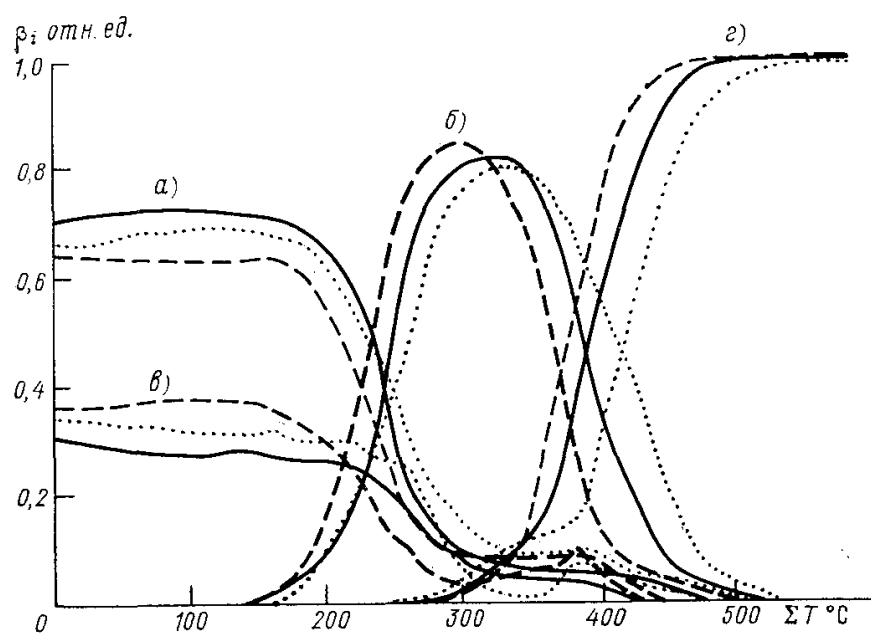


Рис. 4.10. Функции роста отдельных органов овса (сорт Львовский 78), полученные экспериментально. Подмосковье.
Усл. обозначения см. рис. 4.8.

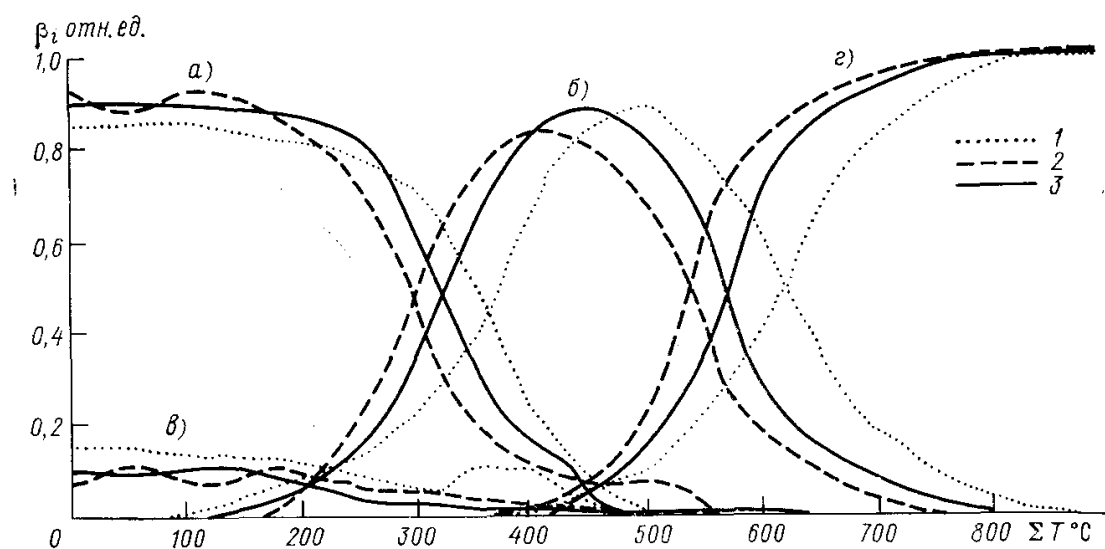


Рис. 4.11. Функции роста отдельных органов картофеля (сорт Детскосельский), полученные экспериментально. Подмосковье.
а — листья, б — стебли, в — корни, г — клубни; 1 — 1977 г., 2 — 1978 г., 3 — 1979 г.

овса и картофеля, полученные по данным полевых экспериментов. Естественно, что ростовые функции, полученные экспериментально, несколько различаются в разные годы, что можно объяснить как различными погодными условиями в годы проведения полевых опытов, так и, возможно, ошибками измерения биомассы, в особенности при небольших значениях приростов биомассы отдельных органов.

Эти различия хорошо прослеживаются по материалам, полученным для всех культур. Так, для озимой пшеницы (см. рис. 4.8) они заметны уже в начальный период вегетации в ходе ростовых функций листьев и корней. У ростовой функции листьев, полученной по материалам полевых экспериментов 1978 г., наблюдается локальный минимум при сумме температур 60°C , тогда как у аналогичной функции, построенной по данным 1977 г., при сумме температур $60\text{--}80^{\circ}\text{C}$ наблюдается локальный максимум. Для ростовой функции корней, которая определена на основе материалов 1977 г., можно отметить локальный минимум при сумме температур 100°C и локальный минимум при сумме температур 140°C . Экспериментальная ростовая функция корней за 1978 г. имеет локальный максимум при сумме температур 60°C и далее идет ее убывание. Результаты полевых наблюдений в 1979 г. дают более гладкий ход этих ростовых функций.

Значительно отличается по годам (см. рис. 4.8) время наступления максимальных значений у ростовой функции стеблей, ход убывания этой функции. Например, при сумме температур 300°C , когда значения ростовых функций стеблей убывают, а репродуктивных органов возрастают, разница в численных значениях этих функций, полученных в различные по агрометеорологическим условиям годы, достигает соответственно 0,36 и 0,40.

Аналогичные отличия хода ростовых функций, обусловленные различиями погодных условий в годы проведения опытов, наблюдаются и у ярового ячменя, овса и картофеля (см. рис. 4.9—4.11).

Как мы уже указывали ранее, в динамических моделях формирования урожая используются осредненные ростовые функции. Построенные по осредненным материалам за период 1977—1979 гг. сглаженные ростовые функции представлены на рис. 4.12—4.15. Для них характерен более плавный ход ростовых функций. На этих же рисунках представлены также ростовые функции, полученные расчетным путем, по предложенному нами методу [200, 204]. Как видно из рис. 4.12—4.15, ход расчетных ростовых функций идентичен ходу сглаженных ростовых функций, полученных экспериментально по методу Росса [221, 222] путем осреднения наших полевых опытов. Это подтверждает правильность всех предпосылок, положенных в основу расчетного метода получения ростовых функций.

Для определения средней относительной ошибки определения ростовых функций по предложенному нами методу в сравнении

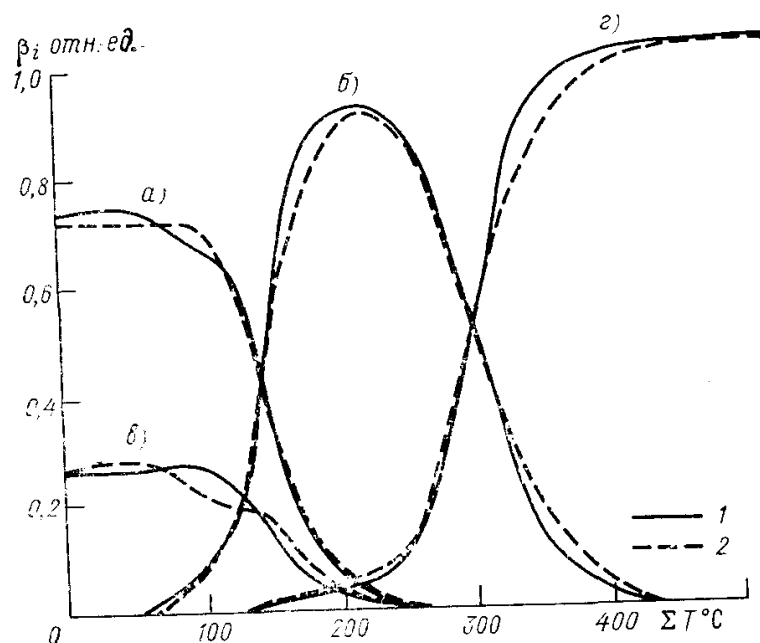


Рис. 4.12. Функции роста отдельных органов озимой пшеницы (сорт Мироновская 808), рассчитанные по методу, предложенному в работах [200, 204], и полученные экспериментально по методу Росса [221, 222] путем осреднения результатов наших полевых опытов за период 1977—1979 гг. Подмосковье.

a — листья, b — стебли, v — корни, z — репродуктивные органы; 1 — расчетные данные, 2 — экспериментальные.

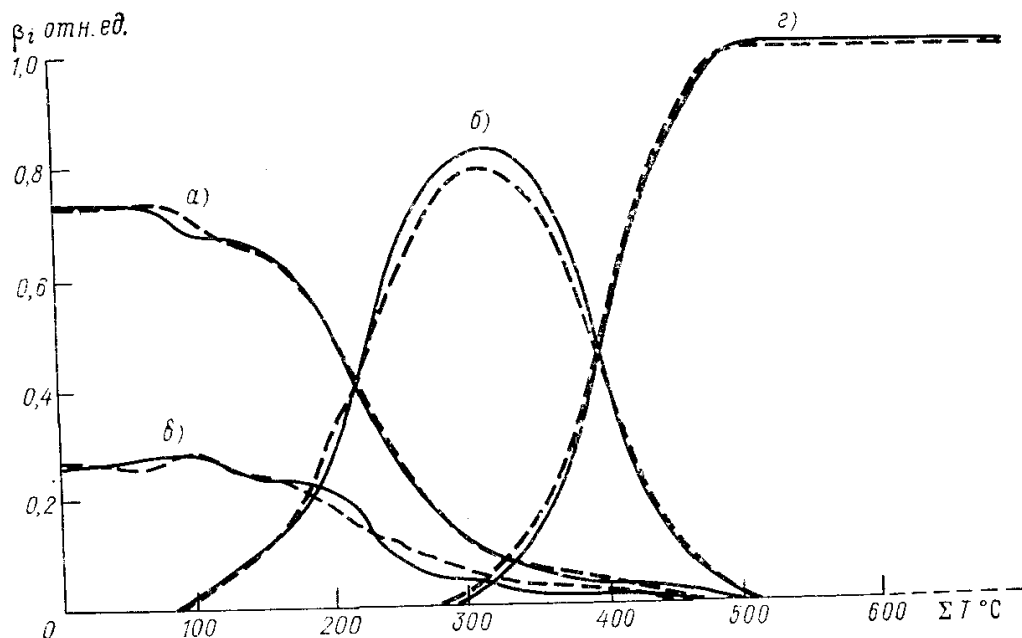


Рис. 4.13. Функции роста отдельных органов ярового ячменя (сорт Московский 121), рассчитанные по методу, предложенному в работах [200, 204], и полученные экспериментально по методу Росса [221, 222] путем осреднения результатов наших полевых опытов за период 1977—1979 гг. Подмосковье.

Усл. обозначения см. рис. 4.12.

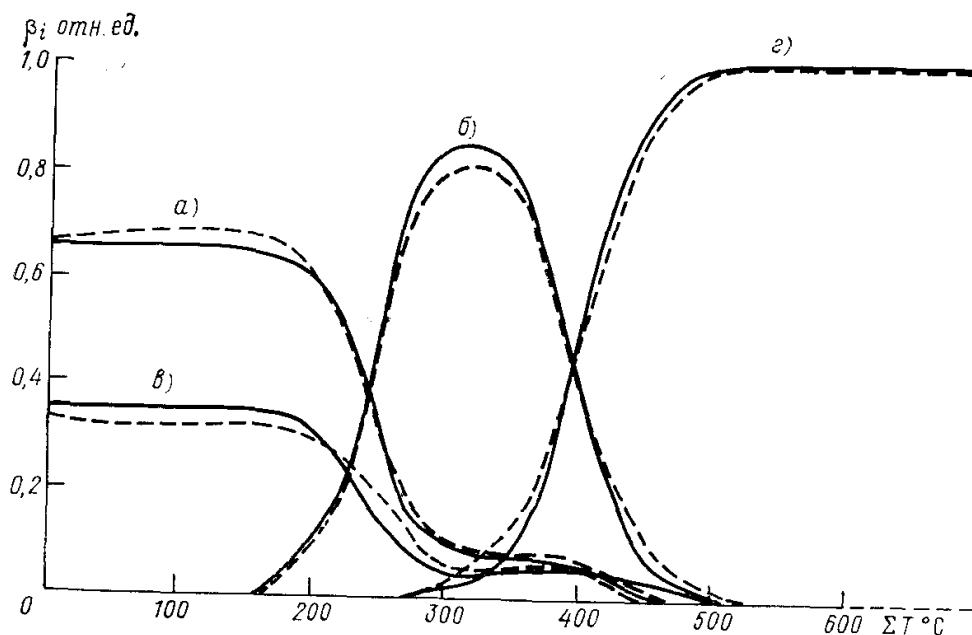


Рис. 4.14. Функции роста отдельных органов овса (сорт Львовский 78), рассчитанные по методу, предложенному в работах [200, 204], и полученные экспериментально по методу Росса [221, 222] путем осреднения результатов наших полевых опытов за период 1977—1979 гг. Подмосковье.

Усл. обозначения см. рис. 4.12.

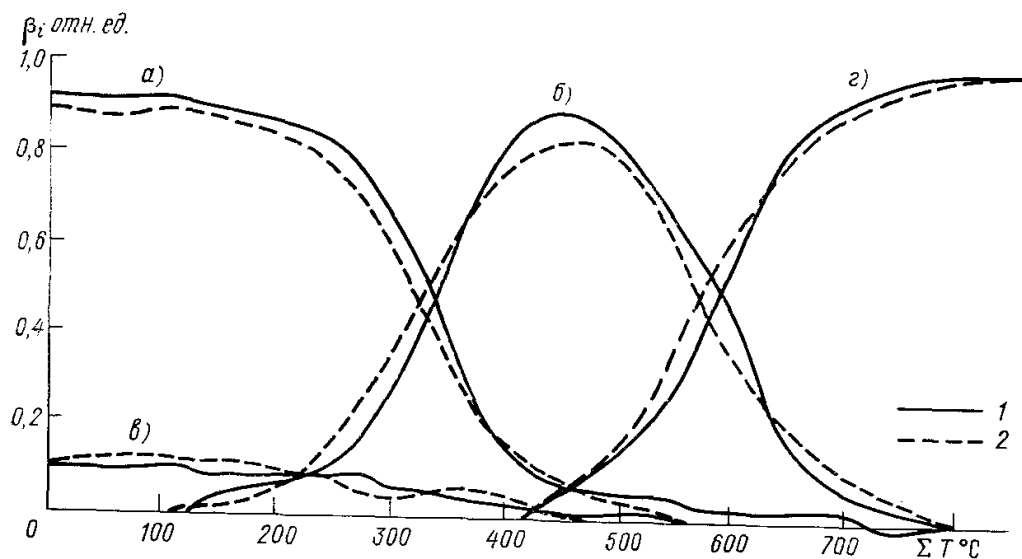


Рис. 4.15. Функции роста отдельных органов картофеля (сорт Детскосельский), рассчитанные по методу, предложенному в работе [200, 204], и полученные экспериментально по методу Росса [221, 222] путем осреднения результатов наших полевых опытов за период 1977—1979 гг. Подмосковье.

a — листья, *b* — стебли, *v* — корни, *г* — клубни; 1 — расчетные данные, 2 — экспериментальные.

с экспериментальным методом их определения воспользуемся выражением вида

$$R_{\text{ср}} = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N \left| \frac{\beta_{\text{эксп}}^i - \beta_{\text{расч}}^i}{\beta_{\text{расч}}^i} \right| \cdot 100,$$

где $\beta_{\text{эксп}}$ — ростовые функции, полученные экспериментально по методу Росса [221, 222] на основе данных наших полевых опытов; $\beta_{\text{расч}}$ — ростовые функции, рассчитанные по предложенному нами методу [200, 204].

Результаты расчета представлены в табл. 4.4. Как видно из данных этой таблицы, средняя относительная ошибка расчетного метода определения ростовых функций составляет для репродуктивных органов озимой пшеницы 4 %, ярового ячменя 8 %, овса 18 % и картофеля 12 %. Учитывая точность определения приростов биомассы, приведенные в табл. 4.6 значения ошибок можно считать вполне приемлемыми для выполнения практических расчетов.

Таблица 4.4. Значения средней относительной ошибки (%) расчета ростовых функций β_i . По данным опытов, проведенных в Подмосковье, 1977—1979 гг.

Культура, сорт	β_l	β_s	β_r	β_p
Озимая пшеница, Мироновская 808	9 (14)	13 (18)	13 (12)	4 (15)
Яровой ячмень, Московский 121	16 (24)	21 (20)	17 (14)	8 (11)
Овес, Львовский 78	12 (24)	11 (16)	13 (11)	18 (12)
Картофель, Детскосельский	19 (28)	24 (31)	24 (16)	12 (19)

Примечание. В скобках указано число случаев измерений.

Интересно также сопоставить полученные расчетные ростовые функции периода вегетативного роста с ростовыми функциями, которые определены экспериментально другими авторами, сравнить результаты, полученные различными авторами для одних и тех же культур.

Наиболее обширная информация имеется для ярового ячменя. Ростовые функции ячменя получены в условиях Эстонии Россом [222] и Тоомингом [255], в условиях Нечерноземной зоны Европейской части СССР Абашинной, Просвиркиной, Сиротенко [4] и Сиротенко, Просвиркиной [238]. Эти ростовые функции приведены на рис. 4.16. Учитывая, что ростовые функции, полученные Галяминым, Сиптицем и Милютиным [41] в условиях Волгоградской области для яровой пшеницы, имеют достаточно общий характер, для получения более полной картины они также приведены на рис. 4.16.

Следует учесть, что приведенные на рис. 4.16 ростовые функции определены для разных территорий. При их построении использован экспериментальный материал, полученный при различ-

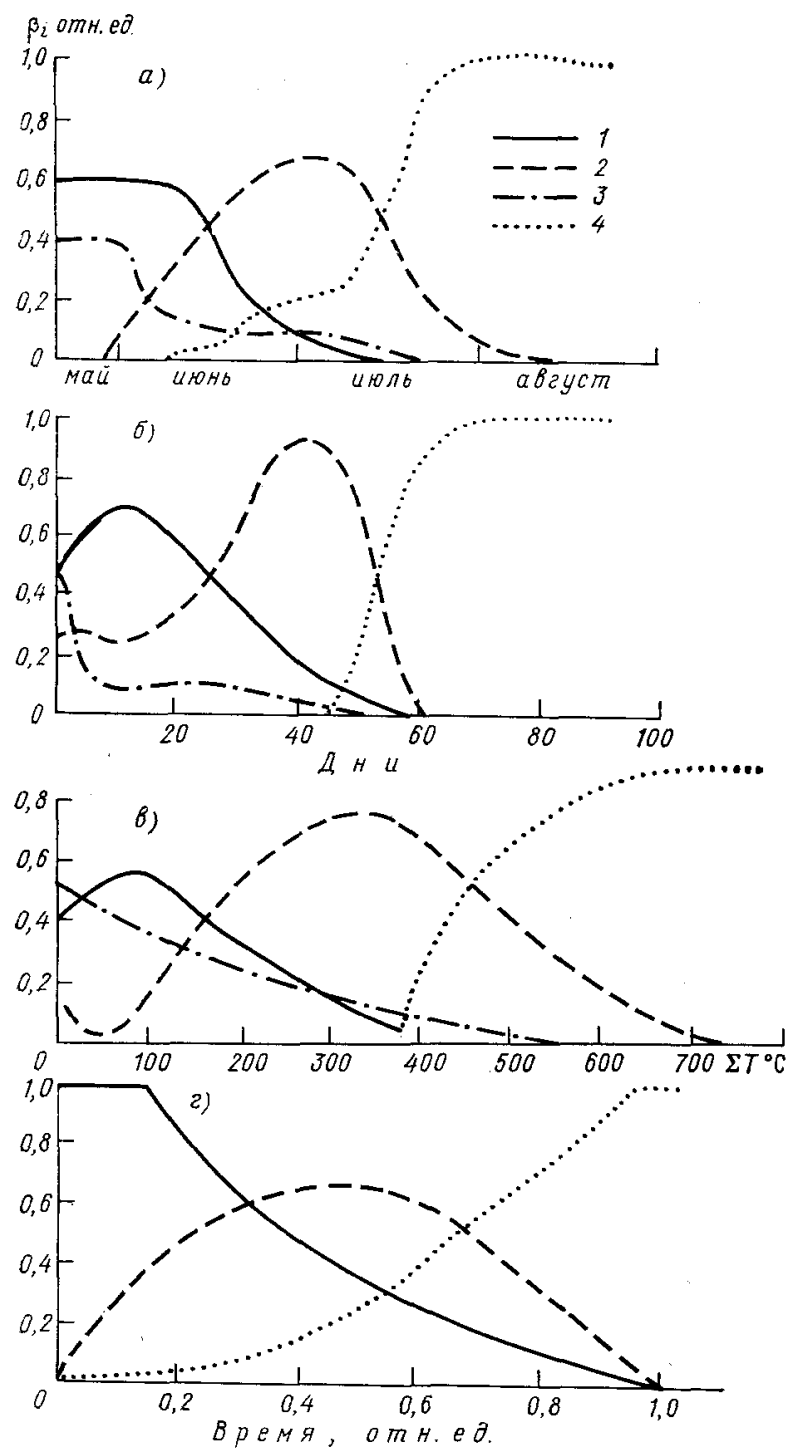


Рис. 4.16. Ростовые функции β_i листьев (1), стеблей (2), корней (3) и репродуктивных органов (4).

а — ячмень, сорт Домен, по данным [222]; б — ячмень, сорт Гейне 4804, по данным [255]; в — ячмень, сорт Московский 121, по данным [238]; г — яровая пшеница, сорт Зерноградская 39, по данным [41].

ных погодных условиях, и принята разная шкала времени. Так, в работах [222 и 255] взяты дни от всходов, в работе [238] — сумма эффективных температур выше 5°C, а в работе [41] использована шкала относительного времени — ростовые функции нормированы по времени роста i -го органа.

Исходя из этого можно говорить только об общих закономерностях изменения ростовых функций во времени, не прибегая к рассмотрению их количественных характеристик.

В первую очередь следует отметить, что ростовые функции периода вегетативного роста, полученные различными авторами, близки по своему внешнему виду (см. рис. 4.16). Несмотря на то что они получены в совершенно различных почвенно-климатических условиях (Эстония, Нечерноземная зона, Волгоградская область), для разных сортов ярового ячменя (сорта Домен, Гейне 4804, Московский 121), яровой пшеницы (сорт Зерноградская 39) и для различного уровня агротехники, наблюдается достаточно общий ход ростовых функций.

Как видно из рис. 4.16, в начальный период вегетации большая доля ассимилятов поступает в листья и корни, затем значительная часть продуктов фотосинтеза начинает поступать в стебли. В период, когда ростовая функция стеблей достигает максимума, начинается поступление ассимилятов в репродуктивные органы и в завершающий период вегетации ростовая функция репродуктивных органов достигает максимальных значений.

Следовательно, сформулированная Россом [221, 222] концепция ростовых функций, на которой основывается получение ростовых функций, приведенных на рис. 4.16, хорошо отражает общие закономерности механизма распределения продуктов фотосинтеза между различными органами.

При анализе ростовых функций, представленных на рис. 4.15, обнаруживаются некоторые различия в их временном ходе. Так, значения ростовых функций листьев, полученные по данным работ [41, 222], после появления всходов сохраняются некоторое время на одном уровне, а затем убывают (см. рис. 4.16 *а* и 4.16 *г*); ростовые функции листьев, согласно данным [238, 255], в начале вегетационного периода быстро достигают максимума, а затем снижаются до нуля (см. рис. 4.16 *б* и 4.16 *в*). Ростовая функция стебля, по данным работы [222], «включается» спустя некоторое время после появления всходов, а ростовая функция стебля, полученная по данным работ [238, 255], «включается» еще при появлении всходов (ср. рис. 4.16 *а*, *б* и *в*).

Если после наступления максимума общий вид ростовых функций стебля для всех приведенных на рис. 4.16 видов и сортов культур аналогичен, то до наступления максимума ход ростовых функций стебля, полученных по данным разных авторов, имеет некоторые отличия. Так, по данным работ [41, 222], кривая, характеризующая ростовую функцию стебля, до наступления максимума имеет вид восходящей ветви параболы (см. рис. 4.16 *а*, *г*). Согласно данным [238, 255], ростовая функция стебля в на-

чальный период вегетации имеет некоторый локальный минимум, после чего быстро возрастает (см. рис. 4.16 б, в). Несмотря на указанные расхождения, изменение ростовых функций вегетативных и репродуктивных органов растений имеет много общего.

Изменения ростовых функций периода вегетативного роста ярового ячменя (см. рис. 4.13), полученных предложенным нами методом, идентичны изменениям ростовых функций, описанных выше (см. рис. 4.16). Ход расчетных ростовых функций, приведенных на рис. 4.13, в основном повторяет ход функций периода вегетативного роста, полученных Россом [222] (см. рис. 4.16 а), что является дополнительным подтверждением правильности всех предпосылок, принятых при их построении.

Перейдем к рассмотрению соответствия функций периода репродуктивного роста, рассчитанных по предложенному нами методу, ростовым функциям, которые получены экспериментально по методу Росса [221, 222] в модификации Галямина [41]. Для сравнения будем использовать результаты наших полевых опытов, выполненных в 1976—1979 гг. в условиях Подмосквья.

Как уже отмечалось ранее, в полевых опытах точность определения приростов биомассы в период ее убывания весьма невысока. В связи с этим результаты, полученные в полевых опытах, можно рассматривать только как приближенные. В табл. 4.5 приведены ростовые функции периода репродуктивного роста, полученные по предложенному нами методу, и значения ростовых функций, которые получены на основе экспериментальных данных. Для последних приведены пределы их изменения. Как видно из данных табл. 4.5, порядок числовых значений ростовых функций, полученных расчетным путем, сравним со значениями функции периода репродуктивного роста, которые определены по экспериментальным данным.

Таблица 4.5. Сравнение расчетных (числитель) и экспериментальных (знаменатель) значений ростовых функций периода репродуктивного роста v_i ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). По данным опытов, проведенных в Подмосквье, 1977—1979 гг.

Культура, сорт	$v_l \times 10^4$	$v_s \times 10^4$	$v_r \times 10^4$
Озимая пшеница, Миrowsкая 808	$\frac{-2,7}{-2,3, -3,1 (15)}$	$\frac{-3,6}{-3,1, -4,2 (17)}$	$\frac{-2,6}{-2,3, -2,8 (4)}$
Яровой ячмень, Московский 121	$\frac{-3,5}{-3,2, -4,0 (13)}$	$\frac{-4,7}{-4,3, -5,1 (14)}$	$\frac{-3,4}{-2,9, -3,8 (2)}$
Овес, Льговский 78	$\frac{-3,4}{-3,0, -3,7 (10)}$	$\frac{-4,4}{-4,1, -4,9 (10)}$	$\frac{-3,2}{-2,7, -3,6 (2)}$
Картофель, Детскосельский	$\frac{-4,0}{-3,6, -4,4 (16)}$	$\frac{-5,1}{-4,8, -5,5 (14)}$	$\frac{-3,9}{-3,6, -4,2 (4)}$

Примечание. В скобках указано число случаев определения приростов биомассы.

Для аналогичной оценки соответствия расчетных и экспериментально полученных ростовых функций были использованы и литературные данные. В работе [19] описаны результаты исследования динамики биомассы пшеницы сорта *World's Seeds 1877*, выполненные с высокой точностью в полностью контролируемых условиях в фитотроне «Нива». В этих экспериментах сухая биомасса листьев и стеблей одного растения возрастала (рис. 4.17) от всходов до 53-го дня вегетации. Ее максимальное значение составило около 12,5 г на одно растение. В период от 53-го до

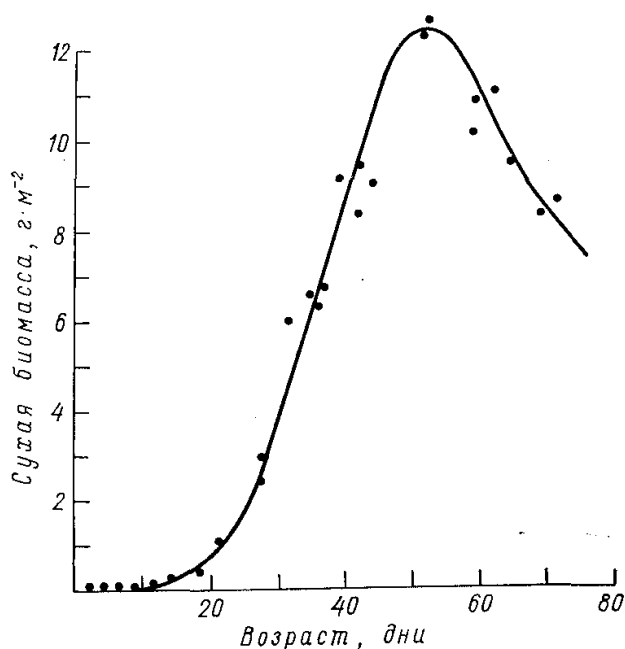


Рис. 4.17. Изменение сухой биомассы листьев и стеблей пшеницы сорта *World's Seeds 1877* в зависимости от возраста растения. По данным [19].

73-го дня от всходов уменьшение биомассы этих органов составило около 4,7 г. Ростовые функции периода репродуктивного роста, полученные на основе этих экспериментальных данных по методу, изложенному в работах [41, 221, 222], изменяются в пределах от $-0,013$ до $-0,034$ сут⁻¹.

На основании этого эксперимента можно принять, что максимальных размеров вегетативные органы достигают на 53-й день от всходов, а созревание растения наступает на 73-й день от начала вегетации. Тогда по предложенному нами выражению (4.25) ростовая функция периода репродуктивного роста будет составлять $-0,015$ сут⁻¹. Нетрудно убедиться, что это значение находится в хорошем соответствии с пределами изменения значений ростовой функции, полученной экспериментально.

В литературе наиболее обширная информация о ростовых функциях периода репродуктивного роста имеется по культуре ярового ячменя. Здесь следует отметить, что приводимые различными авторами числовые значения ростовых функций трудно сопоставимы. Это объясняется не только тем, что они относятся к разным сортам ярового ячменя и получены при отличающихся погодных условиях, но и различной методикой определения росто-

Таблица 4.6. Сравнение ростовых функций периода репродуктивного роста различных органов растений, полученных по данным разных авторов

Номер формулы, принятой для определения	Единица	Значения ростовых функций			Автор
		листьев	стеблей	корней	
Яровой ячмень, сорт Домен					
(4.3)	сут ⁻¹	$(-4 \dots -1) \cdot 10^{-3}$	$(-6 \dots -2) \cdot 10^{-3}$	$(-2 \dots -0,5) \cdot 10^{-3}$	Росс [222]
Яровой ячмень, сорт Гейне 4804					
(4.3)	сут ⁻¹	$(-3 \dots -1) \cdot 10^{-3}$	$(-10 \dots -3) \cdot 10^{-3}$	—	Тооминг [255]
Яровой ячмень, сорт Московский 121					
(4.3)	°C ⁻¹	$-5 \cdot 10^{-3} \dots -1 \cdot 10^{-2}$	—	$-5 \cdot 10^{-3} \dots -1,5 \cdot 10^{-2}$	Абашина, Просвиркина, Сиротенко [4]
(4.3)	сут ⁻¹	$-6,5 \cdot 10^{-2} \dots -1,5 \cdot 10^{-1}$	—	$-6,5 \cdot 10^{-2} \dots -1,5 \cdot 10^{-1*}$	Те же
(4.4)	°C ⁻¹	$-0,1 \cdot 10^{-3} \dots -0,1 \cdot 10^{-2}$	$-0,1 \cdot 10^{-3} \dots -0,1 \cdot 10^{-2}$	$-0,1 \cdot 10^{-3} \dots -0,1 \cdot 10^{-2}$	Сиротенко, Просвиркина [238]
Яровая пшеница, сорт Зерноградская 39					
(4.4)	сут ⁻¹	$(-1,5 \dots -1) \cdot 10^{-2}$	$-6 \cdot 10^{-3} \dots -1 \cdot 10^{-2}$	—	Галямин, Сиптиц, Милотин [41]
(4.4)	°C ⁻¹	$-6,6 \cdot 10^{-4} \dots -1 \cdot 10^{-3}$	$(-6,6 \dots -4) \cdot 10^{-4*}$	—	Те же

Примечание. Звездочкой (*) обозначены данные, пересчитанные нами; средняя суточная эффективная температура выше 5 °C принята равной 15 °C.

1) время начала и прекращения роста i -го органа и время созревания растения по данным стандартных агрометеорологических наблюдений;

2) значение доли i -го органа в целом растении при созревании и значение предельно возможного снижения биомассы при отмирании органа, которые достаточно хорошо известны из литературы.

Глава 5

ПРОВЕРКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ

5.1. Проверка моделей

Экспериментальная проверка длиннопериодных моделей формирования урожая сельскохозяйственных культур является чрезвычайно трудоемкой задачей [15] и требует одновременного измерения различных метеорологических, агрометеорологических и физиологических параметров в полевых и лабораторных условиях. Сравнительная оценка современных моделей продукционного процесса растений показала [15], что только для очень небольшого числа моделей расчеты по модели сопоставлены с результатами специально поставленных для этих целей экспериментов. Во всех остальных случаях также сопоставляются рассчитанные приросты биомассы с измеренными на поле, но при расчете по модели используются параметры, взятые из различных литературных источников, а не измеренные непосредственно на изучаемых растениях.

Проверка моделей велась двумя способами. Первый способ заключался в сопоставлении рассчитанных по модели и эмпирических характеристик биомассы вегетативных и репродуктивных органов, а также площади ассимилирующей поверхности. Сравнение проводилось в динамике, от формирования всходов и до созревания растений. При этом в расчетах частично использовались параметры, которые были получены на основе экспериментов, взятых для проверки моделей. К ним относятся следующие параметры:

$$a_i, \sum T_{1i}, \sum T_{2i}, \sum T_s, \sum T_p, \\ \sum T_g, \sum T_{\text{req } i}, \sum T_{\text{rip}}, c_i, \sigma_i.$$

Было проведено сравнение расчетных и эмпирических значений приростов биомассы вегетативных и репродуктивных органов рассматриваемых культур. Результаты такого сравнения для озимой пшеницы (сорт Мироновская 808) и картофеля (сорт Детскосельский) представлены на рис. 5.1 и 5.2. Как видно из этих рисунков, расчетные значения приростов биомассы удовлетворительно согласуются с эмпирическими значениями. Для небольших значений

вых функций по экспериментальным данным. Имеются также отличия и во временной шкале.

Пределы изменения числовых значений ростовых функций, полученных разными авторами, приведены в табл. 4.6. Мы попытались привести их в сопоставимых единицах.

Как видно из данных табл. 4.6, ростовые функции периода репродуктивного роста в работах [4, 222, 255] получены по единой методике и могут быть сопоставимы. Для сортов ярового ячменя Домен и Гейне 4804 значения ростовых функций достаточно близки. Несколько отличаются они от значений ростовых функций, которые получены для ярового ячменя сорта Московский 121 по данным [4]. Следует отметить, что диапазон изменения ростовых функций отдельных органов ярового ячменя достаточно велик. Вероятно, это объясняется как сортовыми отличиями, так и почвенно-климатическими, погодными и агротехническими условиями проведения полевых экспериментов.

В работах [41, 238] принята единая методика определения ростовых функций, что позволяет с известной степенью осторожности сопоставить эти ростовые функции. Они относятся к разным культурам и получены в существенно отличных условиях. Однако несмотря на это числовые значения ростовых функций отдельных органов вполне сопоставимы.

Различия в методике определения ростовых функций периода репродуктивного роста не позволяют сравнить между собой все имеющиеся значения этих функций (см. табл. 4.6). Можно только отметить тенденцию к росту абсолютных значений ростовых функций стебля по сравнению с аналогичной функцией листьев. Необходимо также указать, что из-за ограниченности исходных экспериментальных материалов приведенные сведения о ростовых функциях корней незначительны (см. табл. 4.6).

Сравнение полученных расчетным способом ростовых функций ярового ячменя с числовыми значениями этих функций (табл. 4.5 и 4.6), приведенными в работах [41, 238], показывает, что они находятся в удовлетворительном согласии.

Таким образом, изложенные выше результаты оценки предлагаемого нами метода определения ростовых функций периода репродуктивного роста [200, 204, 205] показывают, что этот метод дает сравнимые с экспериментальным методом результаты и, следовательно, вполне приемлем для практических расчетов.

Разработанные полуэмпирические методы определения ростовых функций периода вегетативного и репродуктивного роста [200, 204, 205] основаны на рассмотрении частного случая закона роста и моделирования наиболее общего процесса, характеризующего старение живых организмов,— распада жизнедеятельных структур. Этим определяется теоретическое значение методов. Их практическая значимость состоит в возможности оценки ростовых функций, используя лишь два типа входной информации:

приростов биомассы расчетные данные лучше согласуются с эмпирическими. Различие между расчетными и эмпирическими значениями более заметно при больших значениях приростов биомассы. Можно отметить, что наблюдается превышение расчетных значений над фактическими (см. рис. 5.1 и 5.2).

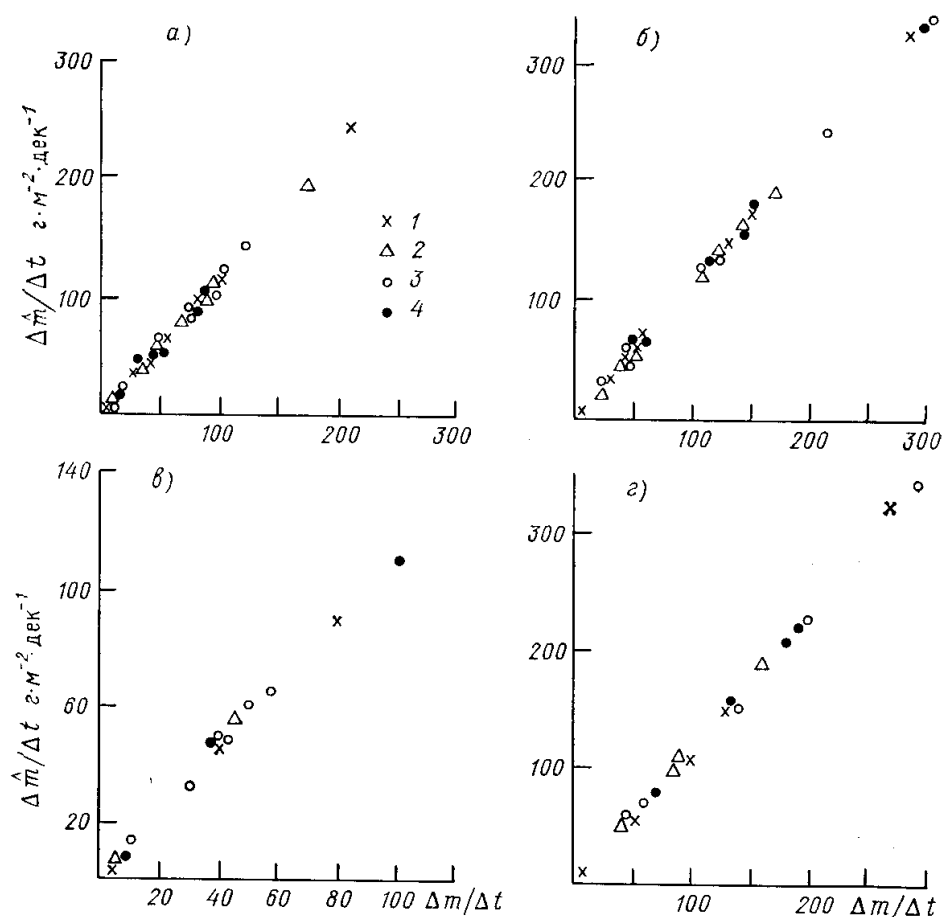


Рис. 5.1. Сравнение расчетных ($\Delta \hat{m}/\Delta t$) и эмпирических ($\Delta m/\Delta t$) значений ($\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{дек}^{-1}$) приростов биомассы отдельных органов растений за декаду. Озимая пшеница, сорт Мироновская 808; Подмосковье.

а — листья, б — стебли, в — корни, г — репродуктивные органы; 1 — данные 1976 г., 2 — 1977 г., 3 — 1978 г., 4 — 1979 г.

Это обстоятельство объясняется следующим образом. Как уже было указано ранее, в расчетах только частично использовались параметры, полученные на основе экспериментальных данных. Числовые значения параметров для расчета интенсивности фотосинтеза, дыхания и некоторые другие определены по литературным данным, которые, как правило, получены при оптимальных условиях минерального питания или, если они определялись в полевых условиях, — при высоком уровне агротехники. Это обусловило более высокие значения этих параметров, особенно параметров световой кривой фотосинтеза. Вследствие этого оказалось, что при использовании в модели таких параметров, расчетные зна-

чения приростов биомассы несколько превышали эмпирические, полученные в наших экспериментах.

Количественные характеристики степени соответствия расчетных и эмпирических значений относительной площади ассимилирующей поверхности и биомассы репродуктивных органов приве-

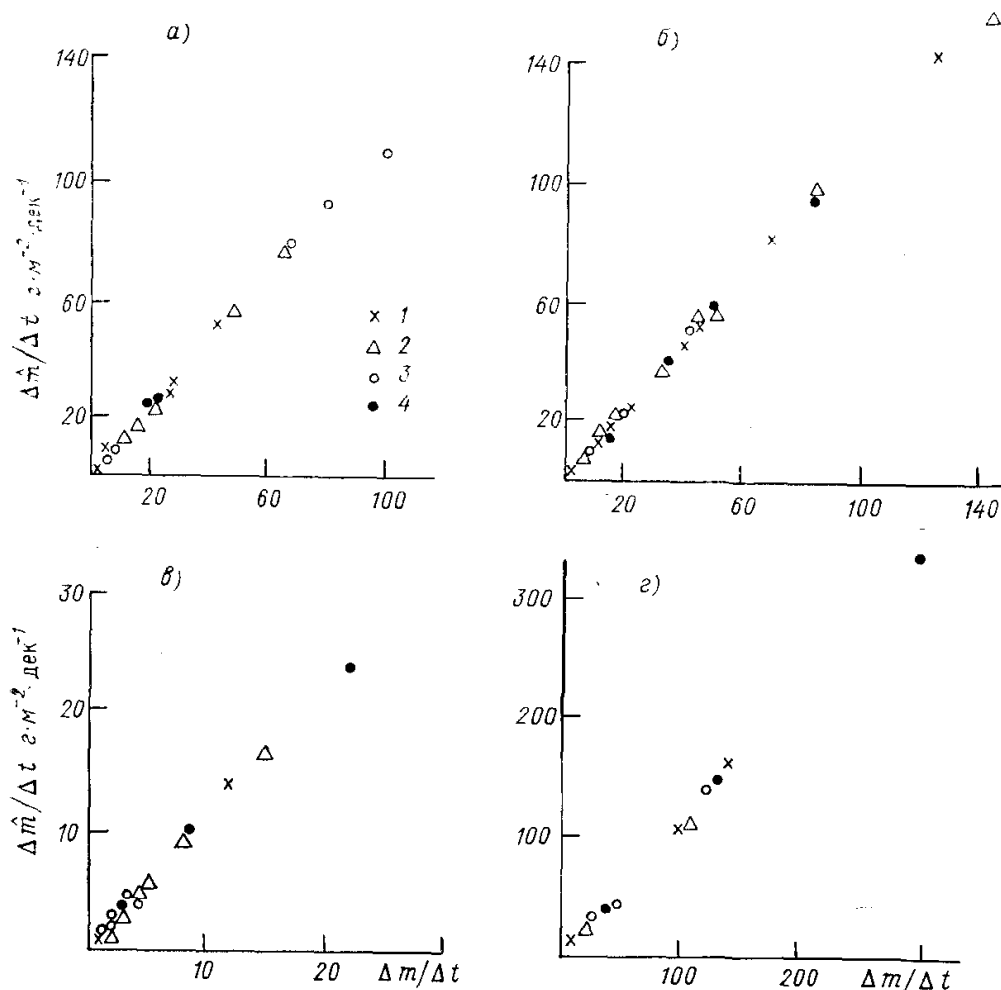


Рис. 5.2. Сравнение расчетных ($\Delta \hat{m}/\Delta t$) и эмпирических ($\Delta m/\Delta t$) значений ($\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{дек}^{-1}$) приростов биомассы отдельных органов растений за декаду. Картофель, сорт Детскосельский; Подмосковье.

а — листья, б — стебли, в — корни, г — клубни; 1 — данные 1976 г., 2 — 1977 г., 3 — 1978 г., 4 — 1979 г.

дены в табл. 5.1. Средняя относительная ошибка расчета определялась по формуле (4.7), для чего были взяты расчетные и эмпирические значения относительной площади листьев и биомассы репродуктивных органов по декадам вегетации.

Средняя относительная ошибка расчета площади листовой поверхности оказалась для всех культур несколько меньше (12—18 %), чем для репродуктивных органов (14—21 %).

Отметим, что наименьшая точность получена при расчетах по динамической модели формирования урожая овса, что, принимая во внимание весьма скудную информацию о влиянии факторов среды на интенсивность фотосинтеза этой культуры, использован-

ную при определении температурной кривой фотосинтеза, вполне объяснимо.

Таблица 5.1. Значения относительной ошибки (%) расчета площади листьев и биомассы репродуктивных органов. По данным суточной агрометеорологической информации; Подмоскowie, 1976—1979 гг.

Культура, сорт	Ошибка расчета, %	
	относительной площади листьев	биомассы репродуктивных органов
Озимая пшеница, Мироновская 808	12 (27)	14 (16)
Яровой ячмень, Московский 121	14 (24)	16 (14)
Овес, Львовский 78	18 (21)	21 (12)
Картофель, Детскосельский	15 (29)	17 (23)

Примечание. В скобках указано число измерений.

Второй способ проверки моделей заключался в следующем. Так как параметры моделей определены для какого-то вполне определенного уровня агротехники, то при переходе к расчету параметров растительного покрова в условиях более высокой или низкой агротехники нельзя ожидать совпадения абсолютных значений урожайности. Более важным обстоятельством является то, насколько синхронны от года к году колебания фактической урожайности, обусловленные влиянием погодных условий конкретных лет, и вычисленной урожайности, при расчете которой в качестве входной использована информация, характеризующая агрометеорологические особенности этих конкретных лет.

Сравнивался рассчитанный по модели урожай зерна и клубней с фактическими данными биологической урожайности сельскохозяйственных культур, которые для зерновых культур получены по предложенной нами методике [106], а для картофеля — с учетом необходимых требований [185]. Оценка синхронности колебаний фактической урожайности и вычисленной урожайности показала (рис. 5.3 и 5.4), что в 92 % случаев эти колебания синхронны, что позволяет говорить о возможности использования предложенных динамических моделей формирования урожайности для оценки агрометеорологических условий произрастания сельскохозяйственных культур.

5.2. Исследование чувствительности моделей

Для определения возможностей моделей, границ их адекватности и особенностей поведения при различных значениях входных воздействий воспользуемся упрощенным методом исследования динамических моделей экосистем [44], связанным с проведением численных экспериментов.

При расчетах по моделям на начало расчета (всходы или возобновление вегетации) задаются измеренные значения био-

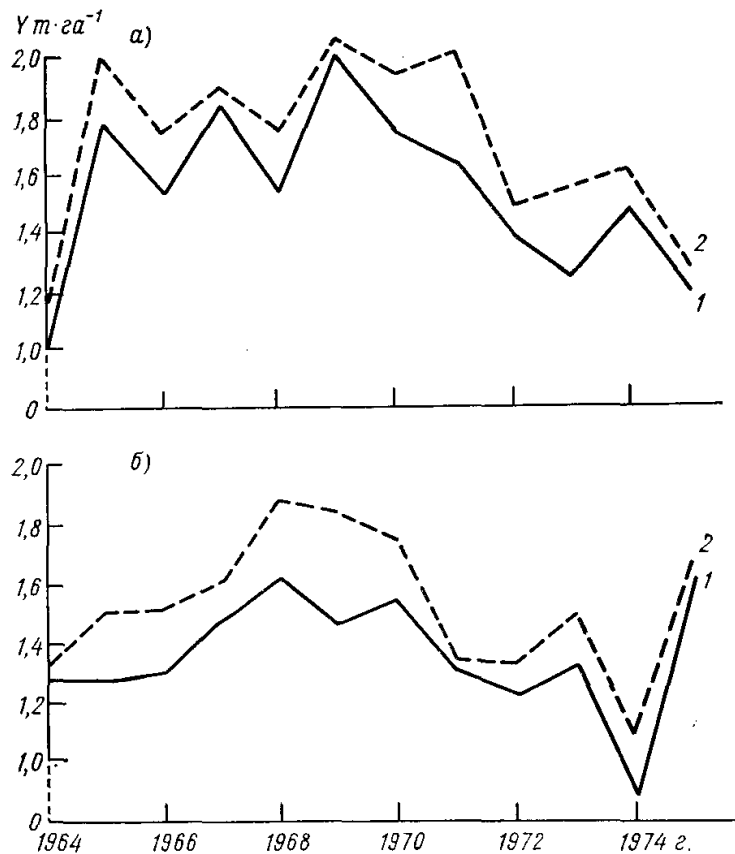


Рис. 5.3. Ход фактических (1) и расчетных (2) урожаев.

а — озимая пшеница, сорт Мироновская 808 (ст. Михайловское); *б* — ярового ячменя, сорт Московский 121 (ст. Кудиново).

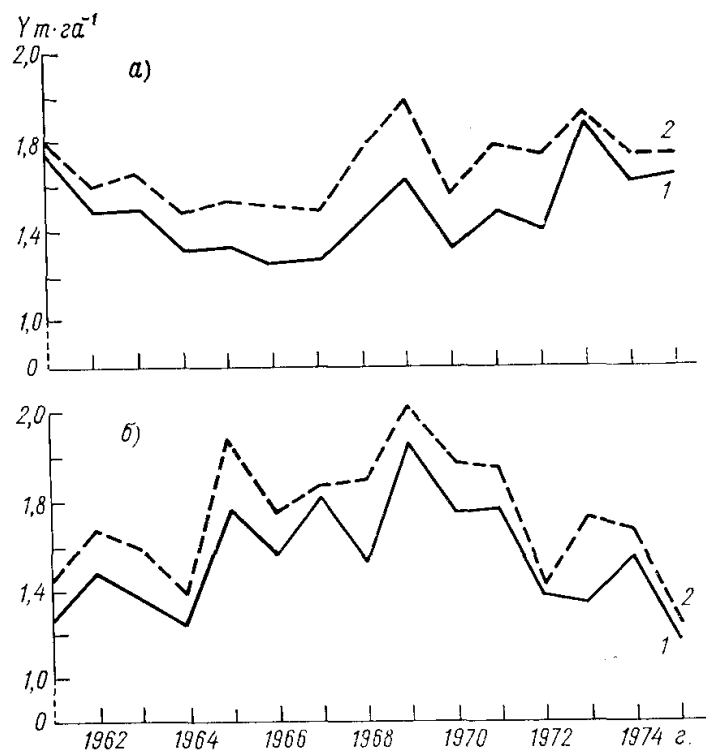


Рис. 5.4. Ход фактических (1) и расчетных (2) урожаев.

а — овес, сорт Львовский 78 (ст. Суходрев); *б* — картофель, сорт Детскосельский (ст. Кудиново).

массы различных органов растения и площади ассимилирующей поверхности. Естественно, что из-за неизбежных ошибок измерения, эти значения всегда будут отличаться от истинных.

Рассмотрим зависимость формирования площади листовой поверхности и накопления биомассы репродуктивных органов от

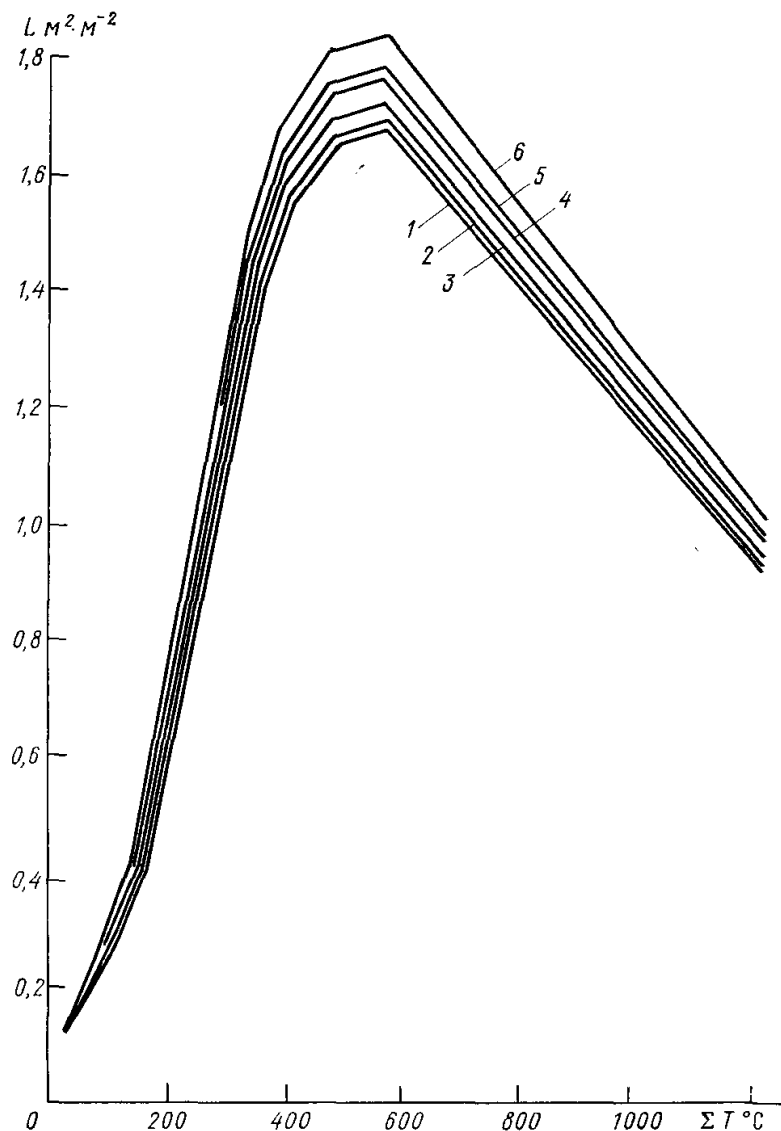


Рис. 5.5. Динамика относительной площади ассимилирующей поверхности картофеля в зависимости от ее начальных значений.

1 — начальные значения относительной площади взяты без изменения, 2, 3, 4, 5, 6 — при изменении начальных значений площади соответственно на 1, 5, 10, 15 и 20 %.

начального состояния. Для этой цели проведем расчеты по модели с изменением начальных значений L , m_l , m_s и m_r на 1, 5, 10, 15 и 20 %.

Как видно из рис. 5.5, в течение периода вегетации, особенно в первую половину, заметны различия в динамике относительной площади ассимилирующей поверхности в зависимости от ее начальных значений. Это хорошо прослеживается в период макси-

мального развития площади ассимилирующей поверхности, когда между крайними вариантами численного эксперимента различия в относительной площади листьев достигают $0,15 \text{ м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$.

Ошибка в задании начальных значений площади листьев на 20 % приводит к ошибке в расчете биомассы репродуктивных органов на 7,6 % (табл. 5.2). Как видно из приведенных в табл. 5.2 данных, модель более чувствительна к изменению начальной относительной площади ассимилирующей поверхности, чем начальных значений биомассы.

Таблица 5.2. Ошибки расчета (%) биомассы репродуктивных органов при изменении начальных параметров растительного покрова. Картофель, сорт Детскосельский

Параметр	Ошибка, %		Параметр	Ошибка, %	
	измерения	расчета		измерения	расчета
Относительная площадь листовой поверхности	0	0	Общая биомасса	0	0
	1	0,32		1	0,02
	5	1,60		5	0,06
	10	3,80		10	0,12
	15	4,80		15	0,17
	20	7,60		20	0,24

Принимая во внимание, что в моделях используются лишь приближенные оценки параметров, рассмотрим, как погрешности их определения влияют на точность получаемых результатов. При анализе чувствительности моделей к изменению параметров c_Q , Φ_{\max} , a_F , c_G , c_m и k_s последним придавалось приращение 1, 5, 10, 15 и 20 %. Результаты этих расчетов приведены в табл. 5.3, где представлены значения биомассы репродуктивных органов ко времени прекращения вегетации и ошибки их вычисления. Как видно из данных этой таблицы, ошибки расчета биомассы репродуктивных органов увеличиваются с возрастанием погрешности определения всех параметров модели; для параметров Φ_{\max} , a_F и k_s ошибки достигают довольно больших значений. Наибольшее относительное расхождение наблюдается между расчетами модели с параметром Φ_{\max} и с параметром $\Phi_{\max} + \Delta\Phi_{\max}$.

Изменения относительной площади листьев и биомассы репродуктивных органов при различных значениях параметра Φ_{\max} приведены на рис. 5.6. Из этого рисунка видно, что при небольших изменениях этого параметра изменяется ход формирования ассимиляционного аппарата и существенно меняется продуктивность растительного покрова.

Менее чувствительна модель к изменению параметров a_F , c_G и c_m (табл. 5.3). Все эти параметры определяют интенсивность описываемых процессов фотосинтеза, дыхания и прироста растительной массы на каждом шаге расчетного периода и поэтому дина-

Таблица 5.3. Влияние погрешности определения параметров модели на точность расчетов биомассы репродуктивных органов. Картофель, сорт Детскосельский

Параметр	Приращение параметра, %					
	0	1	5	10	15	20
Биомасса, г · м ⁻²						
c_Q	286,64	278,76	275,01	271,38	265,82	262,63
Φ_{\max}	286,64	290,48	305,82	324,90	343,79	362,46
a_Φ	286,64	289,15	299,10	311,32	323,29	335,03
c_G	286,64	285,94	283,16	279,72	276,33	272,99
c_m	286,64	285,94	282,16	278,13	273,87	269,72
k_s	286,64	288,13	290,82	295,27	301,45	310,17
Параметр	Приращение параметра, %					
	0	1	5	10	15	20
Ошибка расчета биомассы, %						
c_Q	0	2,75	4,06	5,33	7,83	9,14
Φ_{\max}	0	1,3	6,7	13,3	19,9	26,4
a_Φ	0	0,87	4,3	8,6	12,7	16,8
c_G	0	0,25	1,22	2,42	3,60	4,77
c_m	0	0,25	1,57	2,87	4,46	5,81
k_s	0	0,52	1,46	3,01	5,17	8,21

мика площади листовой поверхности, всей биомассы посевов, а в конечном итоге и биомассы репродуктивных органов зависят от погрешностей их определения.

Как ранее отмечалось, при разработке динамических моделей был выдвинут ряд требований, которые могли быть выполнены только при известной схематизации описания отдельных процессов жизнедеятельности растения, привлечении тех или иных эмпирических связей, что определило соответствующую структуру моделей.

При определении структуры модели исходили из концепции изменения интенсивности процессов фотосинтеза и дыхания с физиологическим возрастом отдельного органа и всего растения. Возможный отказ от этих представлений и соответствующие изменения в структуре модели могут привести к самым неожиданным результатам (рис. 5.7). Как видно из рис. 5.7, исключение параметров α_Φ и α_R , характеризующих изменения фотосинтетической и дыхательной активности отдельных органов растения в онтогенезе, приводит к значительным погрешностям расчета биомассы репродуктивных органов посевов.

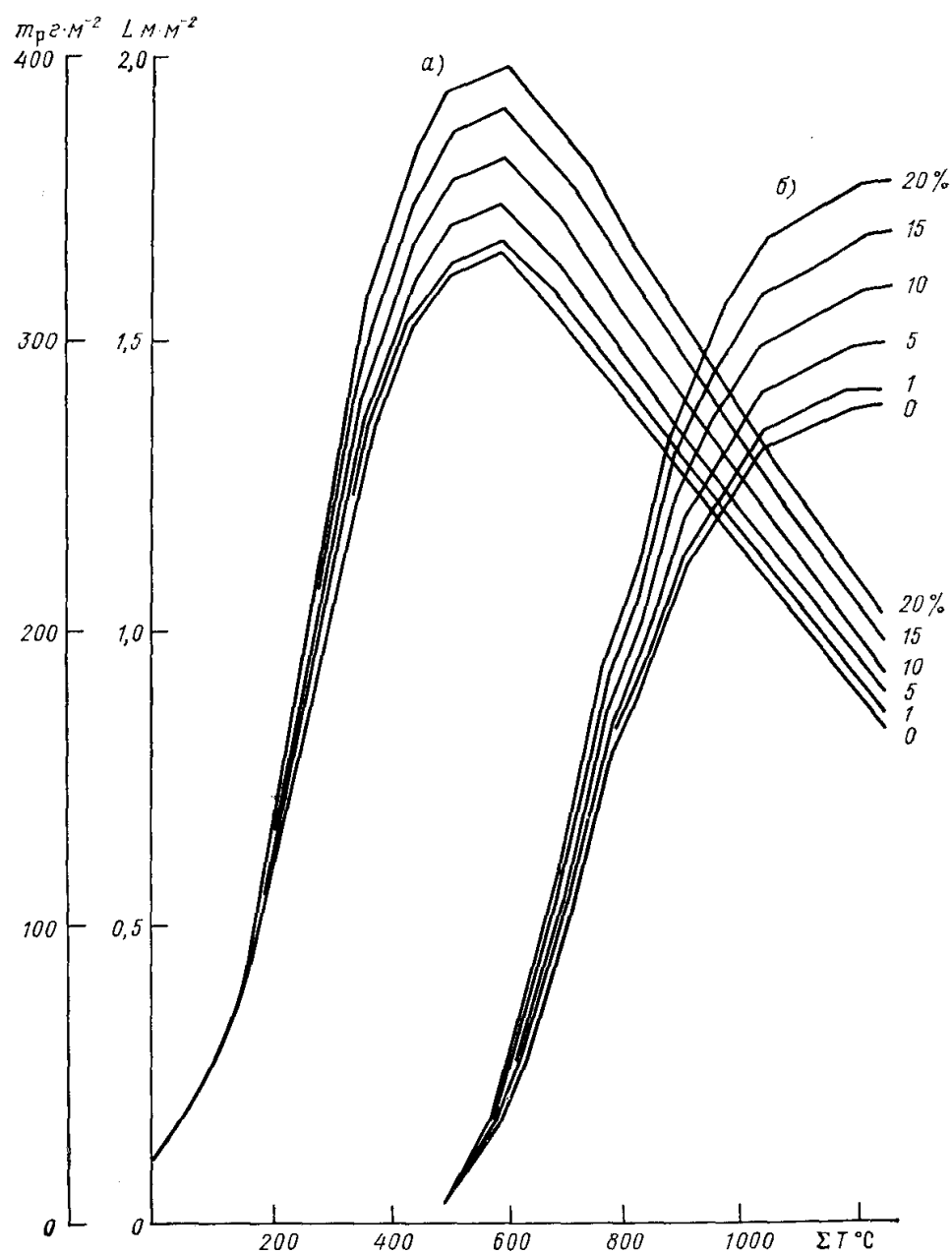


Рис. 5.6. Динамика относительной площади листьев (а) и биомассы репродуктивных органов картофеля (б) в зависимости от изменения параметра Φ_{max} на 0, 1, 5, 10, 15 и 20 %.

Цифры в поле рисунка — приращение параметра Φ_{max} (%).

Рассмотрим вопрос о чувствительности модели к изменению ее аналитической структуры. Для этой цели используем зависимость функции фотосинтеза от плотности потока падающей ФАР, кото-

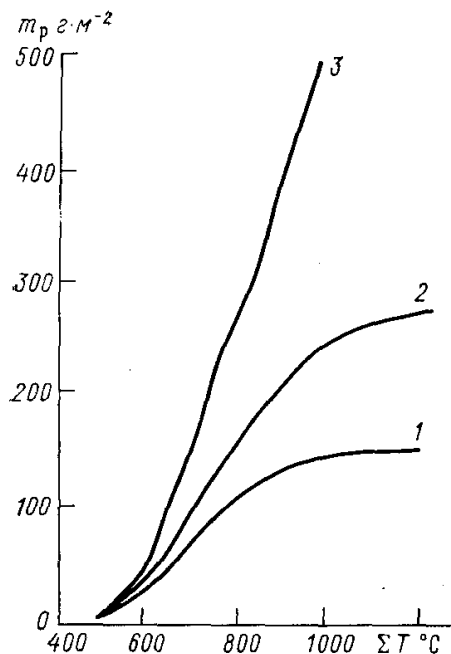


Рис. 5.7. Расчетные значения динамики биомассы репродуктивных органов картофеля.

1 — при исключении из структуры модели параметра α_R , характеризующего изменение дыхательной активности органов растения в онтогенезе; 2 — полная структура модели; 3 — при исключении из структуры модели параметра α_Φ , характеризующего онтогенетический аспект фотосинтеза.

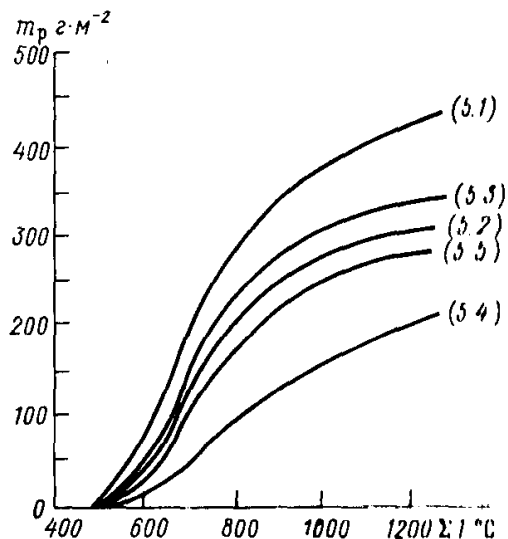


Рис. 5.8. Изменение биомассы репродуктивных органов картофеля в зависимости от выбора эмпирической формулы для описания функции фотосинтеза.

Цифры у кривых соответствуют номерам формул, принятых для описания функций фотосинтеза.

рая обычно выражается эмпирическими формулами следующего вида [388]:

$$\Phi = a_\Phi I, \quad \Phi = \Phi_{\max}, \quad (5.1)$$

$$\Phi = \frac{a_\Phi \Phi_{\max} I}{(\Phi_{\max}^2 + a_\Phi^2 I^2)^{1/2}}, \quad (5.2)$$

$$\Phi = \Phi_{\max} (1 - e^{-a_\Phi I / \Phi_{\max}}), \quad (5.3)$$

$$\Phi = a_\Phi I (1 - e^{\Phi_{\max} / a_\Phi I}), \quad (5.4)$$

$$\Phi = \frac{a_\Phi I \Phi_{\max}}{a_\Phi I + \Phi_{\max}}. \quad (5.5)$$

Приведенные выше уравнения описывают световые кривые фотосинтеза, которые имеют общие характеристики: все они проходят через начало координат, не имеют точки перегиба, достигают асимптоты при высоких значениях плотности потока падающей ФАР. На рис. 5.8 представлены изменения общей биомассы посевов в зависимости от принятой в модели формулы фотосин-

теза. Как видно из рис. 5.8, замена функции (5.5) функцией (5.2) незначительно влияет на результаты расчета динамики накопле-

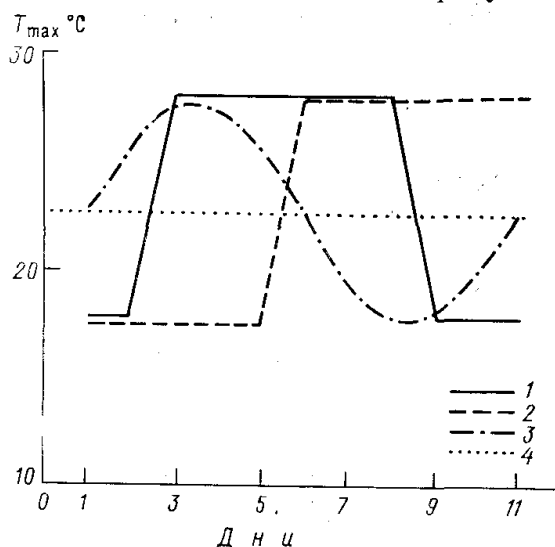


Рис. 5.9. Ход средней максимальной температуры воздуха в течение 3-й декады июля.

1 — кратковременное повышение; 2 — резкое и устойчивое потепление; 3 — синусоидальный ход; 4 — средняя максимальная температура.

ния биомассы. Использование при расчетах функций (5.2), (5.3) и (5.5) дает близкие результаты. Вместе с тем замена функцией

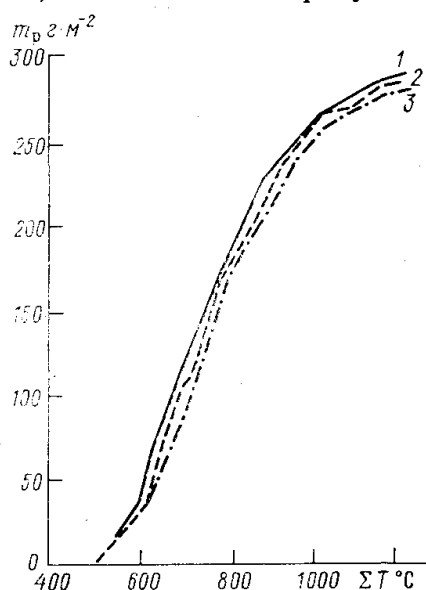


Рис. 5.10. Зависимость изменения биомассы клубней картофеля от хода средней максимальной температуры воздуха в 3-й декаде июля.

1 — кратковременное повышение; 2 — резкое и устойчивое потепление; 3 — синусоидальный ход.

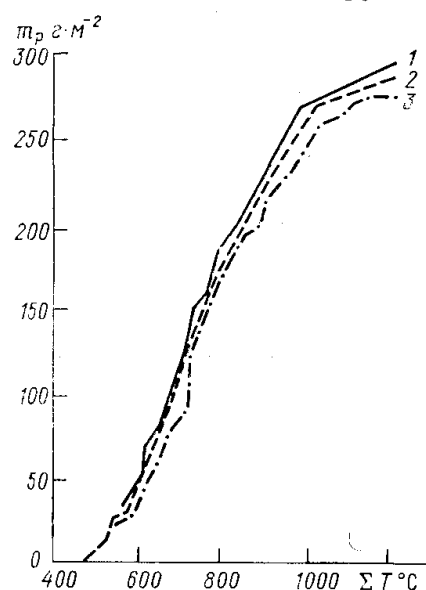


Рис. 5.11. Зависимость изменения биомассы клубней картофеля от хода суммы осадков в 3-й декаде июля.

1 — равномерное выпадение осадков в течение 4–8 дней декады; 2 — кратковременное выпадение осадков в середине декады; 3 — равномерное выпадение осадков в течение декады.

(5.1) или (5.4) вызывает более существенные изменения расчетных значений биомассы.

Основной целью предложенных моделей является правильное описание влияния факторов среды на основные процессы жизне-

деятельности, а в конечном итоге и на их продуктивность. Для оценки чувствительности моделей к изменению входных переменных, характеризующих агрометеорологические условия произрастания культуры, воспользуемся описанным в работе [44] способом.

Сохраняя средний уровень температуры в течение одной декады неизменным, на вход модели будем задавать среднюю суточную и максимальную температуру воздуха в виде: а) резкого кратковременного повышения температуры воздуха в середине декады (на протяжении 5 дней); б) резкого устойчивого повышения температуры воздуха с середины декады (от 6-го до 10-го дня); в) синусоидального хода температуры воздуха в течение декады (рис. 5.9).

Аналогичным образом были проведены численные эксперименты и с регулированием суточной суммы осадков в течение декады. На рис. 5.10 и 5.11 представлена динамика репродуктивной биомассы посевов при подаче на входы модели информации в различном виде. Как видно из рис. 5.10 и 5.11, даже в пределах небольшого периода при сохранении тех же условий модель чувствительна к изменению входных параметров, особенно если они характеризуют резкие изменения условий внешней среды.

Полученные результаты хорошо согласуются с общими представлениями о динамике прироста биомассы посевов при изменении термического режима и условий увлажнения.

5.3. Оценка географической изменчивости параметров моделей

Значительный интерес представляет вопрос изменчивости параметров моделей в зависимости от климатических условий возделывания культуры. В первую очередь это относится к ростовым функциям, которые являются важнейшим звеном моделей и определяют распределение «свежих» и «старых» ассимилятов между вегетативными и репродуктивными органами. В современных моделях продукционного процесса географическая изменчивость параметров моделей не исследовалась.

Число работ, посвященных определению ростовых функций сельскохозяйственных культур для различных районов СССР, невелико. Пока еще отсутствуют достаточно обширные материалы прямых наблюдений, которые позволили бы исследовать географическую изменчивость функций периода вегетативного и репродуктивного роста.

В таких условиях большое значение приобретают расчетные методы определения ростовых функций, использование для исследования их географической изменчивости результатов расчетов, которые выполнены при помощи предложенных нами методов, описанных в гл. 4. При использовании расчетных методов средние многолетние ростовые функции определяются по имеющимся средним многолетним значениям температуры воздуха и средним датам наступления фаз развития сельскохозяйственных культур.

По температуре воздуха и фенологии сельскохозяйственных культур имеется наиболее обширная информация, которая систематизирована в самых различных справочных изданиях.

Для изучения географической изменчивости ростовых функций были использованы материалы наблюдений агро- и гидрометеорологических станций, обобщенные в справочниках «Агроклимати-

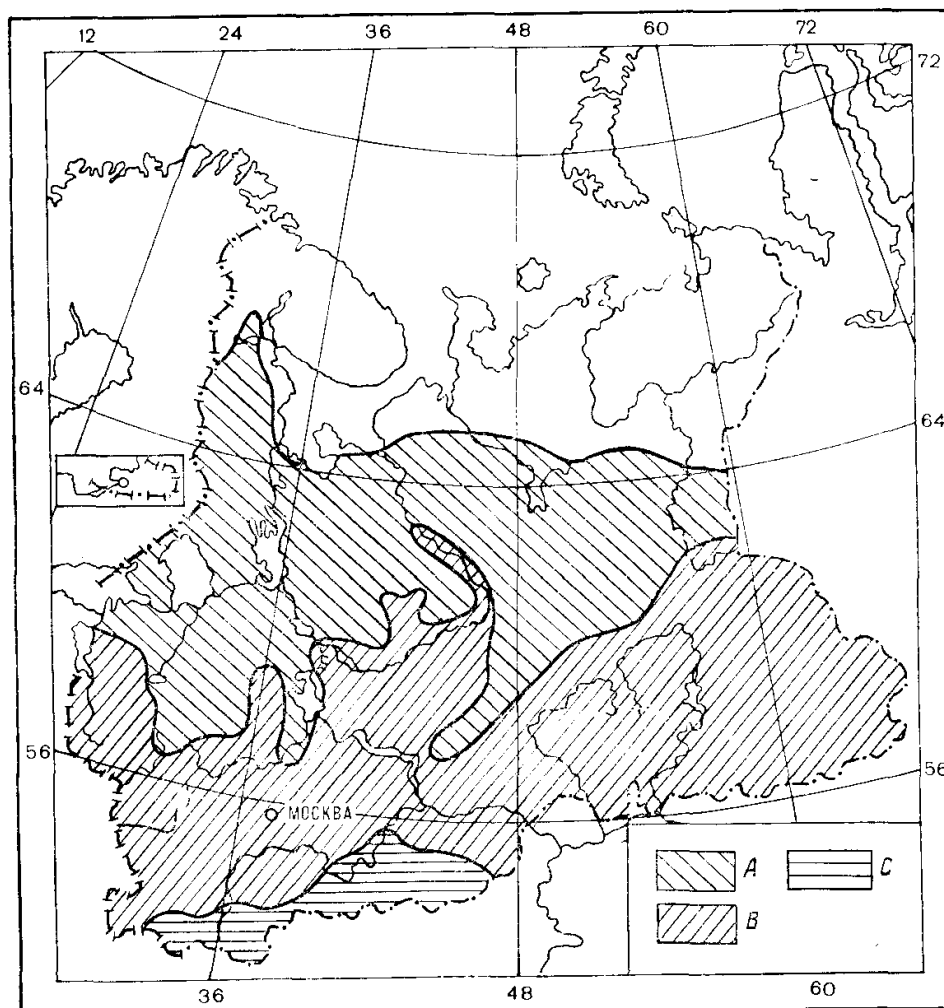


Рис. 5.12. Распределение ростовых функций периода вегетативного и репродуктивного роста озимой пшеницы (сорт Мироновская 808) в Нечерноземной зоне РСФСР (см. табл. 5.4).

ческие ресурсы области». На основании этой информации для Нечерноземной зоны РСФСР были рассчитаны суммы температур за отдельные межфазные периоды рассматриваемых сельскохозяйственных культур. По этим данным были определены ростовые функции периода вегетативного и репродуктивного роста, что позволило построить карты географического распределения ростовых функций в Нечерноземье (рис. 5.12—5.14).

При рассмотрении карт географического распределения ростовых функций сельскохозяйственных культур следует прежде всего отметить, что оно имеет преимущественно зональный характер.

Пространственное распределение ростовых функций в большинстве случаев аналогично распределению сумм температур воздуха за период активной вегетации.

Как видно из карты, представленной на рис. 5.12, на рассматриваемой территории для озимой пшеницы (сорт Мироновская 808) выделяется три зоны с одинаковым ходом ростовых функций.

Зона *A* охватывает северо-западные районы и северную часть центральных районов Нечерноземья. Сумма эффективных температур выше 5 °С за период возобновление вегетации—восковая спелость составляет 800 °С. Рост стебля и колоса начинается соответственно с суммы температур 60 и 150 °С. Уже при сумме температур 350 °С значения β_l , β_s и β_r практически равны нулю, а значения β_p приближаются к единице. Функции периода репродуктивного роста для листьев, стеблей и корней соответственно равны $3,1 \cdot 10^{-4}$; $3,9 \cdot 10^{-4}$; $3,0 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. В этой зоне основной рост колоса заканчивается при сумме эффективных температур, равной 800 °С (табл. 5.4).

Таблица 5.4. Значения ростовых функций периода вегетативного (β отн. ед.) и репродуктивного ($v \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) роста озимой пшеницы (к рис. 5.12)

Параметр	Сумма эффективных температур, °C									$v \times 10^4$
	0	100	200	300	400	500	...	800	900	
Зона А										
β_l	0,73	0,68	0,03	—	—	—	—	—	—	$v_l = 3,1$
β_s	—	0,07	0,92	0,58	0,01	—	—	—	—	$v_s = 3,9$
β_r	0,27	0,25	0,02	—	—	—	—	—	—	$v_r = 3,0$
β_p	—	—	0,03	0,42	0,99	1,00	...	1,00	—	—
Зона В										
β_l	0,73	0,67	0,09	0,02	—	—	—	—	—	$v_l = 2,7$
β_s	—	0,07	0,85	0,78	0,08	—	—	—	—	$v_s = 3,6$
β_r	0,27	0,26	0,03	—	—	—	—	—	—	$v_r = 2,6$
β_p	—	—	0,03	0,20	0,92	1,00	...	1,00	—	—
Зона С										
β_l	0,72	0,68	0,15	—	—	—	—	—	—	$v_l = 2,3$
β_s	—	0,06	0,78	0,80	0,05	—	—	—	—	$v_s = 3,2$
β_r	0,28	0,26	0,04	—	—	—	—	—	—	$v_r = 2,3$
β_p	—	—	0,03	0,20	0,95	1,00	...	1,00	—	—

Примечание. Здесь β — ростовые функции периода вегетативного роста; индексы: *l* — листья, *s* — стебли, *r* — корни, *p* — колосья (клубни); v — функции периода репродуктивного роста.

Основная часть зоны *B* расположена в центральной части Нечерноземной зоны РСФСР (рис. 5.12). Рост вегетативных органов в этой зоне завершается при сумме эффективных температур около 400 °С. При этой сумме температур значения β_l , β_s и β_r

практически равны нулю, а значения β_p приближаются к единице и рост колоса заканчивается при сумме эффективных температур, равной 1000°C . Значения функций периода репродуктивного роста для листьев, стеблей и корней соответственно равны $2,7 \cdot 10^{-4}$, $3,6 \cdot 10^{-4}$, $2,6 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}^{-1}$.

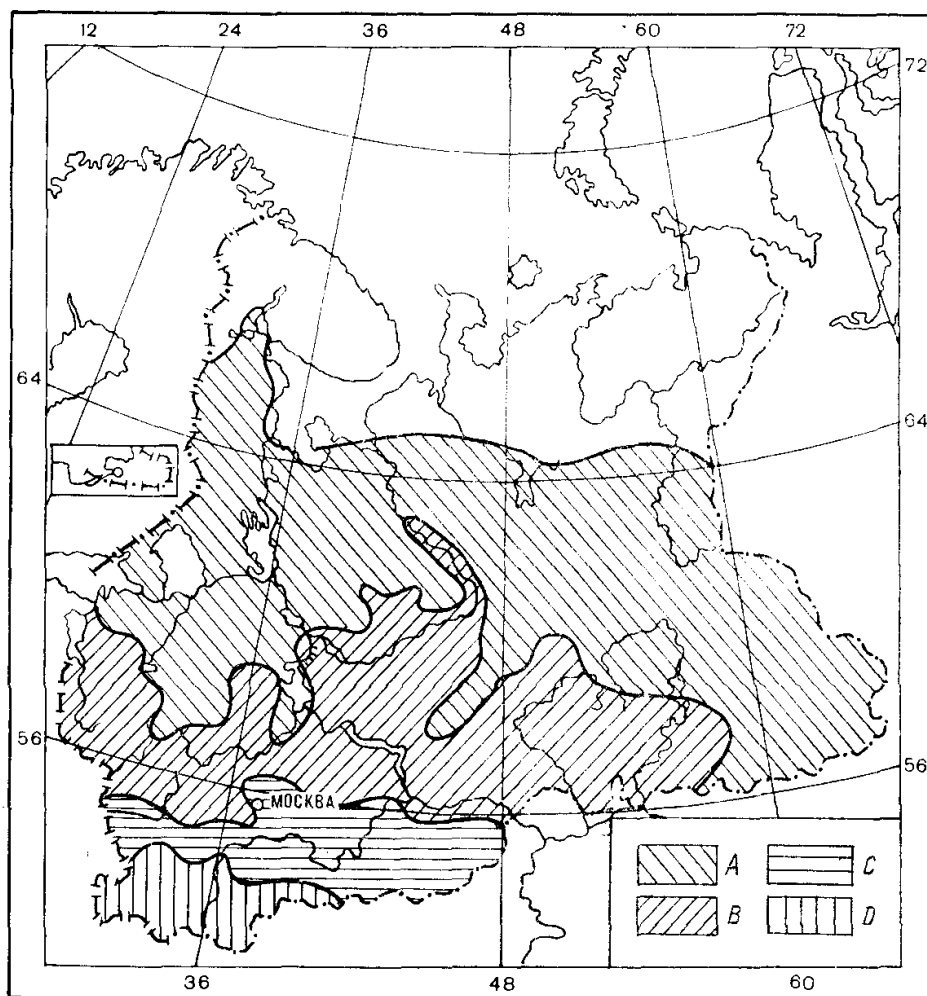


Рис. 5.13. Распределение ростовых функций периода вегетативного и репродуктивного роста овса (сорт Льговский 78) и ячменя (сорт Московский 121) в Нечерноземной зоне РСФСР (см. табл. 5.5).

Для зоны С, охватывающей небольшую часть южных районов Нечерноземной зоны РСФСР (см. рис. 5.12 и табл. 5.4), убывание ростовых функций β_l , β_s и β_r до нулевых значений наблюдается уже при сумме температур около 450°C , на этот момент времени значения β_p достигают единицы и рост колоса продолжается до температуры 1000°C .

Как видно из рис. 5.13 для ярового ячменя (сорт Московский 121) и овса (сорт Льговский 78) на территории Нечерноземья выделены четыре зоны с одинаковым ходом ростовых функций. Общие закономерности географического распределения ростовых функций ярового ячменя и овса аналогичны (табл. 5.5).

Таблица 5.5. Значения ростовых функций периода вегетативного (в отн. ед.) и репродуктивного (v °C⁻¹) роста овса (1) и ячменя (2) (к рис. 5.13)

Параметр	Сумма эффективных температур, °C											
	0		100		200		300		400		500	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Зона А												
β_l	0,64	0,71	0,63	0,67	0,55	0,44	0,09	0,10	0,08	0,02	—	—
β_s	—	—	—	—	0,15	0,40	0,85	0,84	0,15	0,28	—	—
β_r	0,36	0,29	0,37	0,33	0,30	0,16	0,04	0,02	0,07	—	—	—
β_p	—	—	—	—	—	—	0,02	0,04	0,70	0,70	1,00	1,00
Зона В												
β_l	0,65	0,74	0,65	0,69	0,59	0,48	0,11	0,13	0,10	0,05	—	—
β_s	—	—	—	0,06	0,10	0,33	0,82	0,82	0,43	0,40	—	—
β_r	0,35	0,26	0,35	0,25	0,31	0,19	0,06	0,04	0,05	—	—	—
β_p	—	—	—	—	—	—	0,01	0,01	0,42	0,55	1,00	1,00
Зона С												
β_l	0,65	0,72	0,65	0,67	0,59	0,54	0,15	0,17	0,07	0,05	0,04	—
β_s	—	—	—	0,07	0,10	0,26	0,75	0,76	0,70	0,55	0,05	0,05
β_r	0,35	0,28	0,35	0,26	0,31	0,20	0,09	0,07	0,05	0,01	—	—
β_p	—	—	—	—	—	—	0,01	0,03	0,18	0,39	0,91	0,95
Зона D												
β_l	0,65	0,72	0,65	0,66	0,60	0,55	0,20	0,17	0,08	0,05	0,02	0,01
β_s	—	—	—	0,08	0,09	0,23	0,67	0,75	0,72	0,65	0,13	0,08
β_r	0,35	0,28	0,35	0,26	0,31	0,22	0,12	0,06	0,04	0,02	—	—
β_p	—	—	—	—	—	—	0,01	0,02	0,16	0,28	0,85	0,91

Параметр	Сумма эффективных температур, °C								Параметр	1	2
	600		700		800		900				
	1	2	1	2	1	2	1	2			
Зона А											
β_l	—	—	—	—	—	—	—	—	$v_l \times 10^4$	4,1	4,3
β_s	—	—	—	—	—	—	—	—	$v_s \times 10^4$	5,2	5,5
β_r	—	—	—	—	—	—	—	—	$v_r \times 10^4$	3,8	4,1
β_p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	—	—	—	—	—
Зона В											
β_l	—	—	—	—	—	—	—	—	$v_l \times 10^4$	3,7	3,9
β_s	—	—	—	—	—	—	—	—	$v_s \times 10^4$	4,6	5,1
β_r	—	—	—	—	—	—	—	—	$v_r \times 10^4$	3,4	3,8
β_p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	—	—	—	—	—
Зона С											
β_l	—	—	—	—	—	—	—	—	$v_l \times 10^4$	3,4	3,5
β_s	—	—	—	—	—	—	—	—	$v_s \times 10^4$	4,4	4,7
β_r	—	—	—	—	—	—	—	—	$v_r \times 10^4$	3,2	3,4
β_p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	—	—	—
Зона D											
β_l	—	—	—	—	—	—	—	—	$v_l \times 10^4$	3,1	3,3
β_s	—	—	—	—	—	—	—	—	$v_s \times 10^4$	4,0	4,3
β_r	—	—	—	—	—	—	—	—	$v_r \times 10^4$	3,1	3,0
β_p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	—	—	—

С севера на юг в связи с увеличением сумм температур, накапливающихся за вегетационный период, происходит некоторое «растягивание» функций периода вегетативного роста, которое особенно хорошо прослеживается при переходе от зоны *A* к зоне *D* (см. рис. 5.13 и табл. 5.5). Так, например, если у овса при

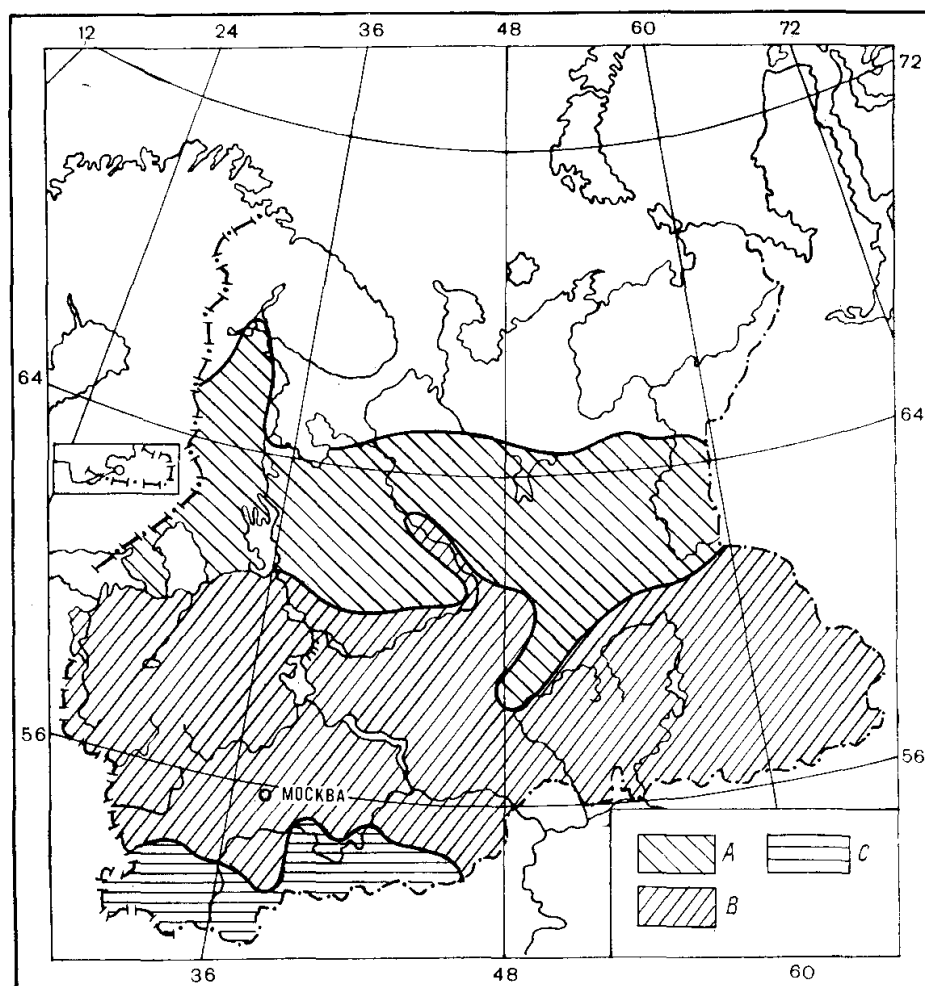


Рис. 5.14. Распределение ростовых функций периода вегетативного и репродуктивного роста картофеля (сорт Деткосельский) в Нечерноземной зоне РСФСР (см. табл. 5.6).

сумме эффективных температур 400°C в зоне *A* ростовые функции вегетативных органов достигают значений 0,07—0,15, а ростовая функция колосьев равна 0,70, то в зоне *D* значение ростовой функции стеблей еще достаточно велико (0,72), тогда как ростовая функция колосьев составляет небольшую величину (0,16).

Функции периода репродуктивного роста также не остаются неизменными и при перемещении с севера на юг несколько изменяются. Происходит уменьшение значения функций периода репродуктивного роста, которое можно объяснить увеличением с севера на юг суммы эффективной температуры за период от вре-

Таблица 5.6. Значения ростовых функций периода вегетативного (β отн. ед.) и репродуктивного (v °C⁻¹) роста картофеля (к рис. 5.14)

Параметр	Сумма активных температур, °С												$v \times 10^4$
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	...	1200	
Зона А													
β_l	0,85	0,86	0,81	0,71	0,23	—	—	—	—	—	—	—	$v_l = 4,3$
β_s	—	0,01	0,08	0,23	0,66	0,90	0,60	0,18	0,04	—	—	—	$v_s = 5,4$
β_r	0,15	0,13	0,11	0,06	0,10	—	—	—	—	—	—	—	$v_r = 4,2$
β_p	—	—	—	—	0,10	0,10	0,40	0,82	0,96	1,00	...	1,00	—
Зона В													
β_l	0,90	0,90	0,87	0,62	0,16	0,01	0,01	—	—	—	—	—	$v_l = 4,0$
β_s	—	—	0,06	0,35	0,82	0,82	0,29	0,07	—	—	—	—	$v_s = 5,1$
β_r	0,10	0,10	0,07	0,03	0,02	0,01	—	—	—	—	—	—	$v_r = 3,9$
β_p	—	—	—	—	—	0,16	0,70	0,93	1,00	1,00	...	1,00	—
Зона С													
β_l	0,93	0,92	0,84	0,45	0,11	0,08	—	—	—	—	—	—	$v_l = 3,6$
β_s	—	—	0,07	0,50	0,84	0,70	0,18	0,04	—	—	—	—	$v_s = 4,7$
β_r	0,07	0,08	0,09	0,05	0,03	0,01	—	—	—	—	—	—	$v_r = 3,5$
β_p	—	—	—	—	0,02	0,21	0,82	0,96	1,00	1,00	...	1,00	—

мени, когда вегетативные органы достигают своих максимальных значений до времени созревания растений.

Для среднеспелых сортов картофеля на рассматриваемой территории выделено три зоны с одинаковым ходом ростовых функций (рис. 5.14).

Как видно из рис. 5.14, зона *A* достаточно обширна и включает в себя северо-западные и северные районы нечерноземной зоны РСФСР. Ее отличает более короткий период вегетации и соответственно более «сжатый» вид ростовых функций периода вегетативного роста. В этой зоне функции периода репродуктивного роста максимальны и достигают значений $(4,2—5,4) \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (табл. 5.6).

Зона *B* охватывает центральные районы Нечерноземья. Ростовые функции периода вегетативного роста β в этой зоне занимают промежуточное положение по сравнению с зонами *A* и *C*. Числовые значения функций периода репродуктивного роста несколько снижаются и составляют $3,9 \cdot 10^{-4}$, $4,0 \cdot 10^{-4}$, $5,1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Южные районы Нечерноземья входят в зону *C*. Функции роста для этой зоны имеют более растянутый вид. Если при сумме температур $600 \text{ } ^\circ\text{C}$ в зоне *C* значения ростовой функции клубней достигали 0,82, то в зоне *A* они составляли еще только 0,40. В этой зоне наблюдаются также существенно меньшие значения функций периода репродуктивного роста.

ЧАСТЬ III

Методы оценки агрометеорологических условий произрастания сельскохозяйственных культур и прогнозирования продуктивности

Предложенные нами модели формирования урожая сельскохозяйственных культур позволяют вести как теоретические исследования влияния агрометеорологических условий на фотосинтетическую продуктивность посевов, так и разработку методов количественной оценки сложившихся агрометеорологических условий произрастания, методов прогнозирования урожая сельскохозяйственных культур.

Глава 6

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ПОСЕВОВ

Динамические модели продуктивности сельскохозяйственных культур дают возможность исследовать зависимость фотосинтеза и дыхания, прироста растительной массы и урожайности как от факторов внешней среды (их экстремальных значений и среднего уровня в течение суток, хода в период вегетации), так и от параметров, в значительной мере определяющих структуру самого посева (изреженность озимых на начало весны, норма высева ранних яровых, густота и сроки посадки картофеля).

С помощью модели формирования урожая можно исследовать фотосинтетическую деятельность посевов в различных ситуациях. Значительный интерес представляют особенности фотосинтетической деятельности посевов в аномальных ситуациях.

При этом могут быть рассмотрены самые различные сочетания параметров, характеризующих условия произрастания.

6.1. Влияние факторов среды на продуктивность посевов

Общий вид световой кривой продуктивности посева, полученной в численном эксперименте, близок к виду световой кривой фотосинтеза листа (рис. 6.1). Световые кривые продуктивности, полученные при различных условиях увлажнения почвы и термического

режима, характеризуются также аналогичным ходом, однако им присущи и некоторые особенности.

Рассмотрим эти особенности.

С увеличением плотности светового потока продуктивность растений возрастает (рис. 6.1 а), но значительный прирост биомассы наблюдается только на фоне достаточного увлажнения (при влажности в слое почвы 0,5 м 80 % наименьшей влагоемкости (НВ)). При недостатке влаги (влажность почвы 20 % НВ) максимальная продуктивность посева в 4 раза меньше, чем при хороших условиях влагообеспеченности.

Как видно из рис. 6.1 б, увеличение продуктивности посева в условиях оптимальной влажности при средней дневной температуре воздуха 10 °С значительно меньше, чем при средней дневной температуре воздуха 22 °С.

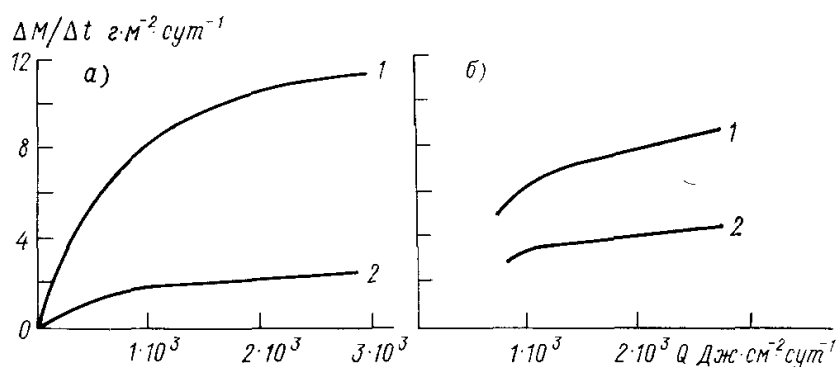


Рис. 6.1. Световые кривые продуктивности посева озимой пшеницы (сорт Мироновская 808) для разных условий водного (а) и теплового (б) режимов. Подмосковье.

а — в условиях оптимальной дневной температуры: 1 — влажность почвы 80 % наименьшей влагоемкости (НВ); 2 — влажность почвы 20 % НВ; б — в условиях оптимальной влажности почвы: 1 — средняя дневная температура воздуха 22 °С, 2 — средняя дневная температура воздуха 10 °С.

Общей закономерностью световых кривых продуктивности посева, приведенных на рис. 6.1, является также некоторое смещение в сторону более высокой плотности светового потока компенсационного пункта при ухудшении условий тепло- и влагообеспеченности. При неблагоприятных условиях произрастания культуры для уравнивания затрат на дыхание фотосинтезом необходима более высокая плотность светового потока.

При оптимальном увлажнении почвы и оптимальной температуре воздуха фактором, находящимся в «минимуме», является солнечная радиация. Из данных, приведенных на рис. 6.2, видно, что при увеличении потока суммарной радиации на верхней границе растительного покрова продуктивность посева всегда возрастает независимо от размеров ассимилирующей поверхности.

Влияние температуры воздуха на продуктивность посевов проявляется через воздействие ее на интенсивность процессов фотосинтеза и дыхания. На рис. 6.3 представлена зависимость продуктивности растительного покрова от температуры воздуха на

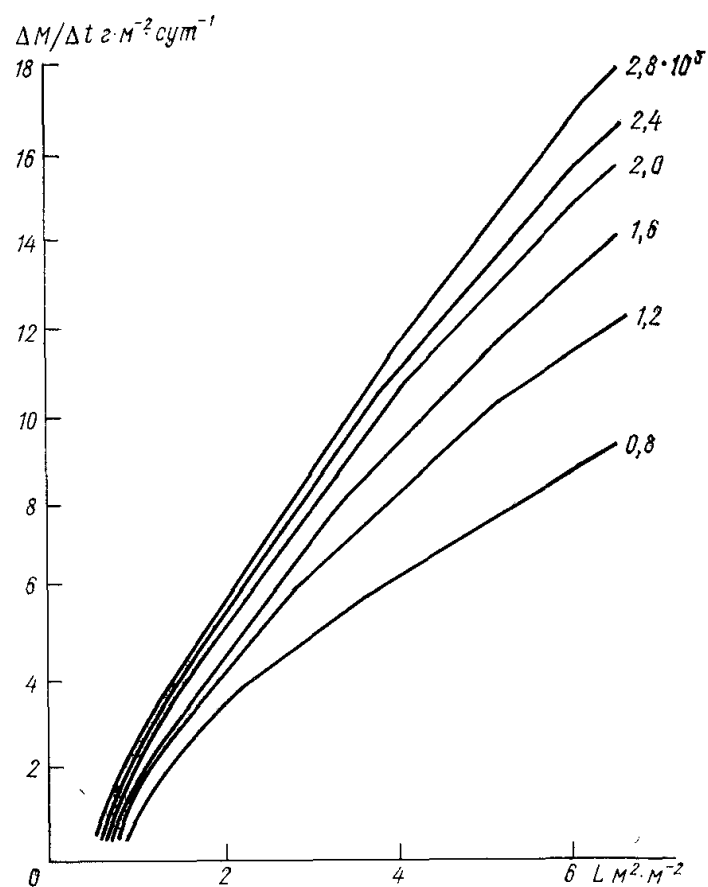


Рис. 6.2. Зависимость продуктивности посева озимой пшеницы (сорт Мироновская 808) от относительной площади листовой поверхности для разных значений потока суммарной радиации. Подмосковье.

Цифры в поле рисунка — поток суммарной радиации, Дж · см⁻² · сут⁻¹.

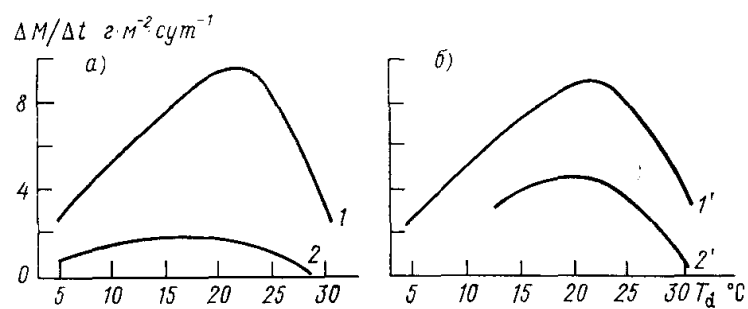


Рис. 6.3. Температурные кривые продуктивности посева озимой пшеницы (сорт Мироновская 808) для разных условий увлажнения (а) и освещенности (б). Подмосковье.

1 — влажность почвы 80 % НВ; 2 — влажность почвы 20 % НВ; 1' — высокая, 2' — низкая плотность светового потока.

фоне различного увлажнения и освещенности. Внешний вид температурных кривых продуктивности аналогичен температурным кривым фотосинтеза.

Как видно из рис. 6.3, при повышении дневной температуры воздуха продуктивность растительного покрова сначала возрастает, а затем, после достижения некоторого максимального значения, убывает. На рис. 6.3 а кривая 1 характеризует зависимость продуктивности посева от температуры на фоне достаточного увлажнения, а кривая 2 — на фоне недостаточного увлажнения.

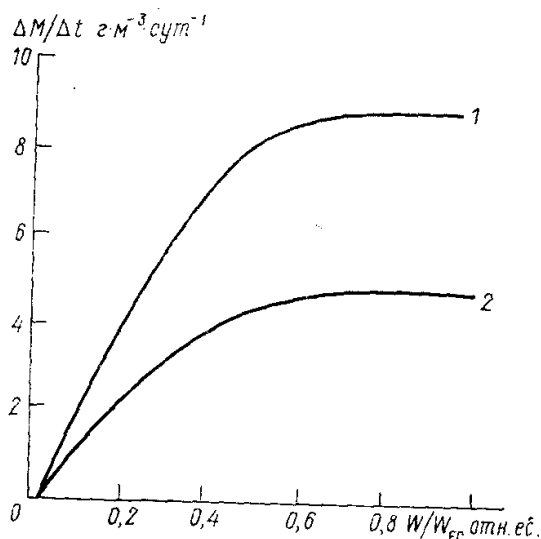


Рис. 6.4. Зависимость продуктивности посева озимой пшеницы (сорт Мирновская 808) от влажности почвы для разной температуры воздуха. Подмосковье.

1, 2 — средняя дневная температура воздуха соответственно 22 и 10 °С.

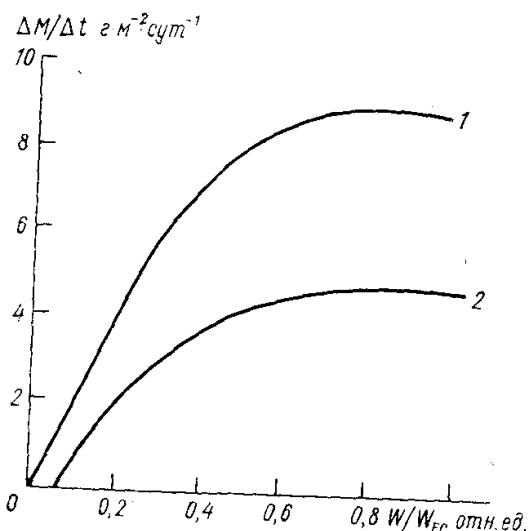


Рис. 6.5. Зависимость продуктивности посева озимой пшеницы (сорт Мирновская 808) от влажности почвы при различной освещенности. Подмосковье

1 — высокая, 2 — низкая плотность светового потока.

Сопоставление кривых 1 и 2 рис. 6.3 а показывает, что при повышении температуры воздуха продуктивность посева увеличивается больше, чем при условии недостаточного увлажнения. Причем как в условиях недостаточного увлажнения (см. рис. 6.3 а, кривая 2), так и при низкой плотности светового потока (см. рис. 6.3 б, кривая 2') наблюдается некоторое смещение температурного оптимума в сторону более низких температур. Это можно объяснить изменением в течение суток соотношения продуктов фотосинтеза и затрат на дыхание.

Общий вид кривых зависимости продуктивности посева от влажности почвы подобен виду кривой, описывающей функцию влияния влажности почвы на фотосинтез. Вместе с тем приведенные на рис. 6.4 данные показывают существенные различия в изменениях продуктивности посева при увеличении влажности почвы на фоне различной температуры воздуха. При увеличении средней дневной температуры с 10 до 22 °С продуктивность посева повышается на 4—4,5 г·м⁻²·сут⁻¹.

Характеристики изменения продуктивности растительного покрова в зависимости от влажности почвы для разных условий освещенности приведены на рис. 6.5. Как видно из рис. 6.5, при достаточном увлажнении продуктивность посева на фоне высокой плотности светового потока значительно больше. При недостаточном увлажнении различия в продуктивности для разных условий освещенности менее заметны.

Результаты расчетов по предложенным нами моделям несколько отличаются в количественном отношении от результатов, полученных в работах [15, 223, 255], но полностью совпадают в качественном отношении. Это вполне закономерно, так как результаты получены на основе моделей, которые построены на одних и тех же общих принципах, хотя модели существенно отличаются как степенью детализации описания отдельных процессов, так и целым рядом параметров, присущих рассматриваемым культурам.

В зависимости от особенностей погодных условий конкретного года показатели фотосинтетической деятельности посевов в онтогенезе могут существенно изменяться. Динамические модели продуктивности позволяют исследовать тенденции изменения этих показателей. Рассмотрим результаты соответствующих численных экспериментов.

6.2. Результаты моделирования фотосинтетической деятельности посевов озимых и яровых зерновых культур

Сроки возобновления вегетации озимых культур в условиях Нечерноземья определяются интенсивностью весенних процессов и могут различаться в отдельные годы на 15—30 дней. Численные эксперименты показывают, что в годы с недостаточным увлажнением (в качестве года-аналога использован 1975 г.) снижается чистая продуктивность фотосинтеза посевов и размеры площади листьев (табл. 6.1).

Как видно из данных табл. 6.1, в условиях достаточного увлажнения (год-аналог 1976 г.) отмечаются несколько повышенный уровень продуктивности фотосинтеза и большая относительная площадь ассимилирующей поверхности, что обусловило и более высокий урожай зерна. Основные показатели фотосинтетической деятельности растений в посевах озимой пшеницы представлены в табл. 6.2. Данные этой таблицы показывают, что разные условия произрастания озимой пшеницы определяют значительные различия фотосинтетического потенциала посевов и площади ассимилирующей поверхности в период максимального развития. Средняя за период вегетации чистая продуктивность фотосинтеза посевов в засушливый год оказалась на $2 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ меньше, чем во влажный. Вследствие благоприятных агрометеорологических условий во влажные годы урожай всей сухой биомассы был выше, и на $2,4 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ оказался выше и урожай зерна.

Таблица 6.1. Изменение роста относительной площади листовой поверхности и чистой продуктивности фотосинтеза озимой пшеницы (сорт Мироновская 808) при различных условиях увлажнения

Год	Апрель			Май		
	1	2	3	1	2	3
Относительная площадь листьев, $\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$						
Засушливый	0,31	0,39	0,66	1,33	1,99	2,30
Влажный	—	0,25	0,61	1,01	2,11	3,99
Чистая продуктивность фотосинтеза, $\text{г} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут}^{-1}$						
Засушливый	—	3,2	1,9	3,0	4,4	4,8
Влажный	—	—	7,3	3,5	3,4	4,1

Год	Июнь			Июль		
	1	2	3	1	2	3
Относительная площадь листьев, $\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$						
Засушливый	2,00	1,42	0,85	0,36	—	—
Влажный	6,00	6,27	5,62	4,26	2,59	1,52
Чистая продуктивность фотосинтеза, $\text{г} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут}^{-1}$						
Засушливый	5,8	7,8	6,0	1,8	2,9	—
Влажный	5,3	6,8	5,5	2,1	0,8	0,1

Таблица 6.2. Влияние условий увлажнения на основные показатели фотосинтетической деятельности растений в посевах озимой пшеницы (сорт Мироновская 808) и урожай зерна

Год	Максимальная относительная площадь листьев, $\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$	Фотосинтетический потенциал, $\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$	Чистая продуктивность фотосинтеза в период максимального развития площади листьев, $\text{г} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут}^{-1}$	Урожай сухой массы при уборке, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$		Коэффициент хозяйственной эффективности, отн. ед.
				всей	зерна	
Засушливый, 1975	2,3	$1,2 \cdot 10^2$	4,8	6,10	2,65	0,43
Влажный, 1976	6,3	$3,5 \cdot 10^2$	6,8	14,23	5,05	0,35

Недостаточно быстрое формирование ассимиляционного аппарата и ограничение его размеров является факторами, наиболее часто снижающими урожай. Изменение норм высева позволяет наиболее эффективно регулировать эти факторы.

Расчеты динамики показателей фотосинтетической продуктивности посевов ярового ячменя (при средних многолетних условиях) в зависимости от норм высева иллюстрируют возможности такого регулирования.

Как и следовало ожидать, ход формирования ассимилирующей поверхности при неодинаковой густоте посева различен (рис. 6.6 а). Загущение посевов ведет к ухудшению условий светового режима и как следствие этого к снижению чистой продуктивности фотосинтеза посевов (рис. 6.6 б).

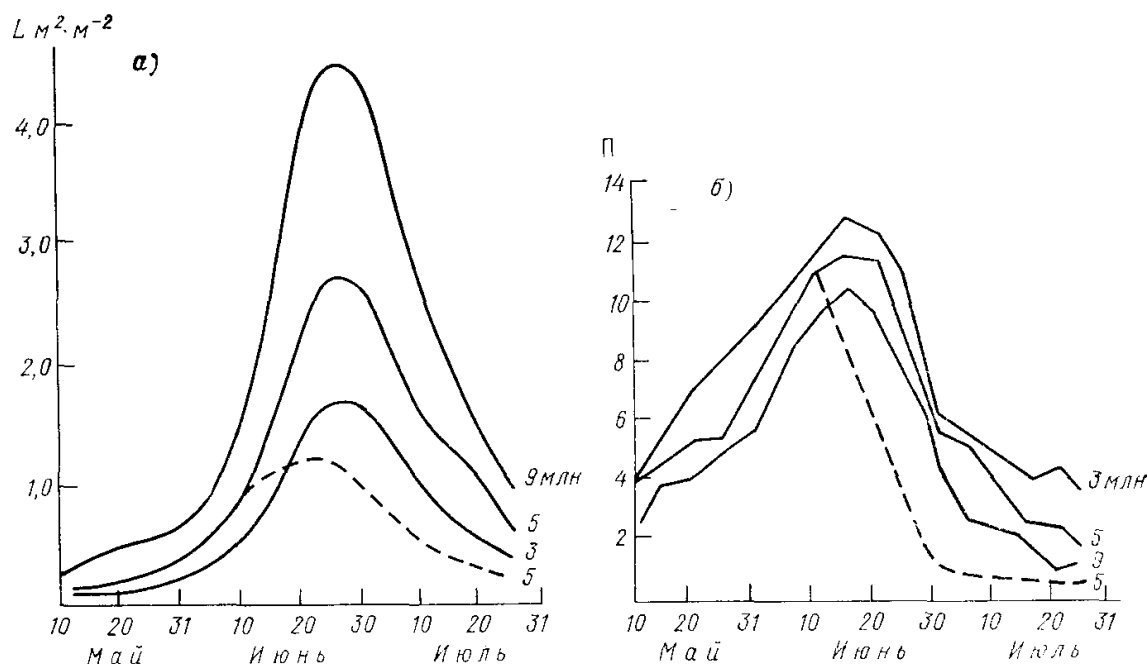


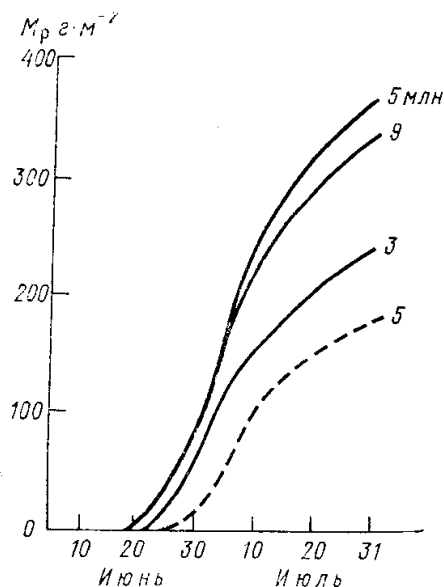
Рис. 6.6. Изменение относительной площади листовой поверхности L (а) и чистой продуктивности фотосинтеза P ($г \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$) (б) посевов ярового ячменя (сорт Московский 121) в зависимости от норм высева при средних многолетних агрометеорологических условиях. Подмосковье.

Цифры в поле рисунка — нормы высева; во второй и третьей декадах июня наблюдалась засуха, норма высева 5 млн.

Однако при норме высева 5 млн. это снижение компенсируется «работой» большей ассимилирующей поверхности, что в конечном итоге и обуславливает различия в накоплении биомассы как вегетативных, так и репродуктивных органов (рис. 6.7). В чрезмерно загущенном посеве снижение продуктивности фотосинтеза от взаимного затенения растений настолько сильное, что оно уже не компенсируется большим числом растений на единицу площади.

Таким образом, уменьшение урожая зерна в этом варианте объясняется повышенным темпом листообразования, в результате чего размеры площади листовой поверхности превышают оптимальные. Уменьшение урожая зерна можно объяснить также снижением продуктивности фотосинтеза посева вследствие ухудшения условий светового режима. Как видно из рис. 6.7, различия в урожайности в зависимости от нормы высева достигают значительных величин.

Отметим также, что характерной особенностью световых кривых продуктивности загущенных посевов в период максимального развития площади листьев (рис. 6.8) является некоторое смещение



у них компенсационного пункта в сторону более высоких значений плотности светового потока.

Как уже указывалось ранее, численные эксперименты с моделью ярового ячменя проводились на фоне средних многолетних агрометеорологических условий.

Рассмотрим ситуацию, когда в середине вегетационного периода

Рис. 6.7. Изменение биомассы репродуктивных органов ярового ячменя (сорт Московский 121) в зависимости от норм высева при средних многолетних агрометеорологических условиях. Подмосковье.

Усл. обозначения см. рис. 6.6.

в течение двух декад (второй и третьей декады июня) наблюдались засушливые условия. В этот период температура воз-

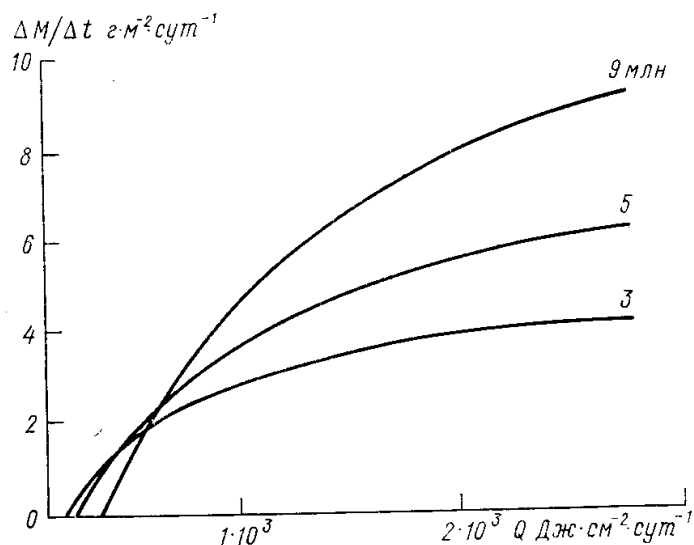


Рис. 6.8. Расчетные световые кривые продуктивности посевов ярового ячменя в период максимального развития площади листьев (сорт Московский 121) при разных нормах высева. Подмосковье.

Цифры в поле рисунка — нормы высева.

духа была на 4°C выше средней многолетней, а запасы влаги в слое почвы 0,5 м составляли 20 % наименьшей влагоемкости. При этом более удобен для анализа вариант со средней нормой высева. Этот вариант на фоне средних многолетних условий будем рассматривать как контрольный.

Как видно из рис. 6.6, засушливые условия изменили ход всех показателей фотосинтетической деятельности посевов ярового ячменя. Резко изменилось формирование ассимилирующей поверхности. В период максимального развития относительная площадь листьев при засухе была почти в 2 раза ниже (см. рис. 6.6 а), чем в контрольном варианте. За две засушливые декады чистая продуктивность фотосинтеза снизилась на $10 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ (рис. 6.6 б). После окончания засухи она сохранялась на очень низком уровне. Изменение площади ассимилирующей поверхности и чистой продуктивности фотосинтеза обусловило и соответствующее изменение биомассы репродуктивных органов (см. рис. 6.7). По сравнению с контрольным вариантом биомасса репродуктивных органов у растений, подвергшихся воздействию засухи, снизилась практически в 2 раза.

6.3. Численные эксперименты с моделью продуктивности картофеля

В условиях Нечерноземья крайне редко наблюдается естественное прекращение вегетации картофеля. Обычно клубнеобразование прекращается из-за повреждения ботвы заморозками или фитофторой. Последнее и определяет сроки уборки урожая картофеля.

Возможное удлинение периода фотосинтетической деятельности посадок картофеля, повышение фотосинтетического потенциала посадок связано с регулированием сроков посадки картофеля. При более быстром формировании ассимиляционного аппарата и достижении им оптимальных размеров наблюдается активная фотосинтетическая деятельность посадок картофеля, которая снижается только к концу вегетации.

В табл. 6.3 приведены расчетные значения относительной площади листовой поверхности и чистой продуктивности фотосинтеза

Таблица 6.3. Относительная площадь листовой поверхности и чистая продуктивность фотосинтеза для разных сроков посадки картофеля, сорт Детскосельский

Срок посадки	Июнь			Июль			Август		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Относительная площадь листовой поверхности, $\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$									
20 мая	—	0,5	1,9	3,6	3,5	3,0	2,5	2,0	1,7
25 мая	—	—	1,1	3,3	3,6	3,2	2,6	2,1	1,8
30 мая	—	—	0,6	2,3	3,6	3,3	2,8	2,3	2,0
5 июня	—	—	—	1,2	3,1	3,3	2,9	2,4	2,1
Чистая продуктивность фотосинтеза, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$									
20 мая	—	—	10,4	11,6	12,0	8,2	8,6	1,3	—
25 мая	—	—	9,8	10,9	12,0	9,3	9,9	2,0	—
30 мая	—	—	—	10,0	11,5	10,0	11,3	2,9	—
5 июня	—	—	—	8,9	10,9	10,5	11,9	3,8	—

картофеля различных сроков посадки. Можно отметить, что смещение сроков посадки картофеля значительно изменило как ход формирования ассимиляционной поверхности, так и продуктивность фотосинтеза. Особенно хорошо это прослеживается на крайних вариантах сроков посадки. При раннем сроке посадки площадь листовой поверхности в основном сформировалась уже к 1-й декаде июля, тогда как при позднем сроке посадки это произошло на 25 дней позже.

Запаздывание сроков посадки на 15 дней привело к снижению на 10 % площади ассимилирующей поверхности в период ее максимального развития (табл. 6.4) и, что особенно важно, почти на 20 % уменьшило фотосинтетический потенциал посадок. Естественно, что урожай хозяйственно ценной части при ранних сроках посадки значительно выше, чем при поздних.

Таблица 6.4. Основные показатели фотосинтетической деятельности растений и урожай при разных сроках посадки картофеля (сорт Детскосельский)

Срок посадки	Максимальная относительная площадь листьев, $\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$	Фотосинтетический потенциал, $\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$	Чистая продуктивность фотосинтеза в период максимального развития площади листьев, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$	Урожай сухой массы при уборке, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$		Коэффициент хозяйственной эффективности, отн. ед.
				всей	клубней	
20 мая	3,64	$1,87 \cdot 10^2$	8,7	13,4	5,7	0,42
25 мая	3,63	$1,77 \cdot 10^2$	9,0	12,8	5,2	0,41
30 мая	3,60	$1,69 \cdot 10^2$	9,2	12,0	4,6	0,38
5 июня	3,28	$1,50 \cdot 10^2$	9,7	10,7	3,6	0,33

При поздних сроках посадки увеличивается вероятность повреждения посадок картофеля заморозками, частичного или полного прекращения периода клубнеобразования. Наиболее губительны для урожая заморозки в период интенсивного клубнеобразования. К началу этого периода рост вегетативных органов растения заканчивается, поэтому изменения фотосинтетической и дыхательной активности, которые происходят под влиянием заморозка, сохраняются до конца вегетации.

В численном эксперименте мы рассматривали заморозки в фазе цветения для двух различающихся по погодным условиям лет, в частности 1972 и 1974 гг. Расчеты по модели с использованием агрометеорологической информации за эти годы принимались в качестве контроля. На фоне агрометеорологических условий этих лет задавались заморозки различной интенсивности.

Как видно из рис. 6.9, даже при заморозке интенсивностью -1°C , не оставившем видимых повреждений, урожай клубней снижается. В 1972 г. это снижение по сравнению с контролем составило $100 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ сухой биомассы клубней (см. рис. 6.9 а), тогда как в 1974 г. — около $200 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ (рис. 6.9 б). При заморозке интенсивностью -3°C наблюдается значительное снижение урожая —

почти в 2 раза по сравнению с контролем. После повреждения посадок картофеля заморозком интенсивностью -4°C клубнеобразование практически прекратилось.

Полученные расчетным путем эффекты изменения хода показателей фотосинтетической деятельности посевов хорошо согласуются с результатами полевых экспериментов [80, 180, 291, 293]. Последнее служит дополнительным подтверждением правильности основных теоретических предпосылок, положенных в основу моделей и открывает, с одной стороны, возможности исследования

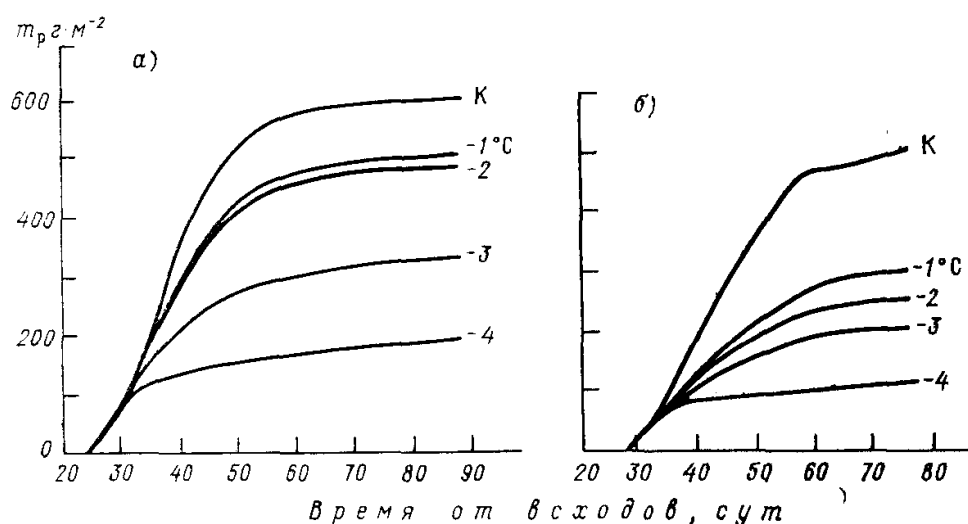


Рис. 6.9. Влияние заморозков различной интенсивности на изменение биомассы клубней картофеля (сорт Деткосельский). Подмосковье.

а — для условий погоды 1972 г.; б — то же для условий 1974 г.; цифры в поле рисунка — интенсивность заморозка; К — контроль.

адаптивных реакций посевов сельскохозяйственных культур в различных условиях, а с другой, — возможности разработки на основе динамических моделей методов оценки агрометеорологических условий произрастания культурных растений.

Глава 7

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЕЙ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА

Оперативные органы Госкомгидромета выпускают многочисленные информационные материалы об агрометеорологических условиях произрастания сельскохозяйственных культур и трав, рекомендации об оптимальных сроках сева, уборки, по уходу за посевами. Все эти материалы основаны на детальной оценке сложившихся и ожидаемых погодных условий. Последняя выполняется с помощью методов оценки агрометеорологических усло-

вий произрастания, которые позволяют оценить степень благоприятности сложившихся агрометеорологических условий для роста, развития и формирования урожайности культуры в сопоставлении с оптимальными, средними многолетними условиями или условиями любого года, взятого в качестве эталона [227].

Основными методами, широко используемыми на практике, являются следующие:

1) методы оценки условий влагообеспеченности посевов сельскохозяйственных культур, предложенные Вериго [34], Процеровым [213], Куликом [103], Конторщиковым [92], Цубербиллер [277], Федосеевым [266];

2) методы оценки условий формирования продуктивности колоса и приростов растительной массы, разработанные Чирковым [281, 286], Пономаревым [208], Поповской [211], Конторщиковой [93];

3) методы оценки условий формирования урожая, созданные Венцкевичем [33] и Зубаревым [75].

Неотъемлемой частью этих методов являются предложенные ШигOLEвым [299] фенологические прогнозы.

Оценка условий проводится по декадам, месяцам и периодам вегетационного цикла. Используемые при оценке значения метеорологических элементов осредняются за соответствующий временной интервал. Вместе с тем еще К. С. Веселовский [36] писал, что «... в средних исчезают крайности, а высшие и низшие температуры характеризуют климат тем более, что они оказывают особенное влияние на органическую жизнь».

Расчеты таких оценок, выполненные с помощью динамических моделей формирования урожая, позволяют сделать их более полными и обстоятельными: органически связать оценку каждого последующего периода с оценкой предыдущего, т. е. учесть последнее действие условий предшествующего периода, рассмотреть более широкий диапазон параметров среды, определяющих интенсивность протекания основных процессов жизнедеятельности растений, а также учесть экстремальные значения параметров среды в течение суток или любого более длительного временного интервала, необходимого для рассмотрения.

Наличие динамических моделей продукционного процесса, разработанных нами для условий Нечерноземья, дает возможность поставить задачу агрометеорологической диагностики с детальным количественным учетом основных факторов, определяющих фотосинтетическую деятельность посевов в их сложной взаимосвязи.

7.1. Основные принципы оценки

Задача агрометеорологической диагностики сводится к определению степени отличия хода показателей фотосинтетической деятельности посевов под воздействием агрометеорологических условий оцениваемого периода от их оптимального или среднего многолетнего хода, обусловленного соответствующим агрометеороло-

гическим режимом, установлению степени благоприятности или неблагоприятности агрометеорологических условий.

Изменения интенсивности фотосинтеза и дыхания приводят к изменению суммарной продуктивности фотосинтеза, что в свою очередь вызывает изменения в динамике биомассы отдельных органов и их ассимилирующей поверхности. Последняя, используемая в качестве начальных значений на следующем шаге расчетов, обуславливает соответствующие изменения фотосинтетической деятельности посевов на этом шаге и т. д.

Изменение количества урожая при вполне определенных, отличающихся от средних многолетних, агрометеорологических условиях в течение оцениваемого временного интервала определяется изменением всех важнейших показателей фотосинтетической деятельности, которое вызвано воздействием этих агрометеорологических условий.

В основу количественной оценки агрометеорологических условий произрастания сельскохозяйственных культур нами [194, 196, 202] положено выражение:

$$C = \hat{m}_{g(p)} / \bar{m}_{g(p)}, \quad (7.1)$$

где C — оценка условий, безразмерная; $\hat{m}_{g(p)}$ — биомасса зерна (клубней), рассчитанная по модели с использованием информации, характеризующей условия оцениваемого периода, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$; $\bar{m}_{g(p)}$ — рассчитанная по модели на основе средних многолетних данных биомасса зерна (клубней), $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$.

Изменение показателей фотосинтетической деятельности посевов под воздействием вполне определенных агрометеорологических условий оцениваемого периода ставится во взаимоднозначное соответствие изменению урожайности. Количественная оценка агрометеорологических условий сводится к расчету по модели биомассы зерна (клубней) с учетом показателей, характеризующих агрометеорологические условия оцениваемого периода, и биомассы зерна (клубней), рассчитанных на фоне климатических условий.

Близость отношения $\hat{m}_{g(p)} / \bar{m}_{g(p)}$ к единице свидетельствует о том, что агрометеорологические условия оцениваемого периода близки к средним многолетним. Значения C менее единицы отражают снижение фотосинтетической активности посевов, обусловленное ухудшением агрометеорологических условий по сравнению со средними многолетними. Благоприятные по сравнению со средними многолетними условия фотосинтетической деятельности посевов, характеризуются отношением $\hat{m}_{g(p)} / \bar{m}_{g(p)}$ больше единицы.

Отношение $\hat{m}_{g(p)} / \bar{m}_{g(p)}$ позволяет количественно установить степень изменения в ту или иную сторону показателей фотосинтетической деятельности посевов, обусловленное влиянием факторов внешней среды.

При сравнении агрометеорологических условий рассматриваемого периода с многолетними открывается возможность оценки их не только по интегральному показателю — биомассе репродуктивных органов. Можно рассматривать изменение интенсивности про-

текания каждого отдельного процесса: фотосинтеза и дыхания, формирования ассимилирующей поверхности и роста отдельных органов.

7.2. Методы оценки условий формирования урожая с использованием суточной агрометеорологической информации

Для выполнения расчетов по предложенным нами динамическим моделям продуктивности основных сельскохозяйственных культур необходимо задать исходные данные:

1) t_0 — календарное время — номер суток расчетного периода, отсчитываемый от 20 марта;

2) φ° — географическая широта пункта;

3) W_{FC} — наименьшая влагоемкость в слое почвы 0,5 м;

4) W^0 — начальные влагозапасы в слое почвы 0,5 м;

5) состояние посевов (табл. 7.1) на момент всходов или возобновления вегетации ($j = 0$):

а) m_i^0 , M^0 — начальные значения биомассы (см. табл. 7.1) каждого органа и всего растения;

б) L_i^0 — начальные значения относительной площади ассимилирующей поверхности i -го органа;

в) для зерновых колосовых культур $m_{g.\max}$ — максимально возможная масса зерна, которая задается исходя из фактической (на всходы) густоты стояния и потенциально возможных продуктивной кустистости, размеров колоса и массы 1000 зерен, присущих данному сорту;

г) для картофеля M_G — содержание сухих веществ в материнском клубне;

Таблица 7.1. Начальные данные для оценки агрометеорологических условий формирования урожая сельскохозяйственных культур

Культура	Биомасса органов, г · м ⁻²			Относительная площадь ассимилирующей поверхности, м ² · м ⁻²	
	m_l^0	m_s^0	m_r^0	L_l^0	L_s^0
Озимая пшеница	0,030	0,020	0,030	$0,0544 \cdot 10^{-2}$	$0,0182 \cdot 10^{-2}$
Яровой ячмень	0,015	0,009	0,017	$0,0301 \cdot 10^{-2}$	$0,0101 \cdot 10^{-2}$
Овес	0,015	0,009	0,017	$0,0301 \cdot 10^{-2}$	$0,0101 \cdot 10^{-2}$
Картофель	0,523	0,158	0,600	$0,0137 \cdot 10^{-2}$	—

б) информацию в течение вегетационного периода:

а) ежедневную:

T_A , T_{\max} , T_{\min} — средняя суточная, максимальная и минимальная температура воздуха;

d_{WA} — средний суточный дефицит влажности воздуха;

SS — число часов солнечного сияния за сутки;
 θ — сумма осадков за сутки;
 б) декадную:
 W — запасы продуктивной влаги в полуметровом слое почвы;
 H — уровень грунтовых вод;
 k_{inf} — степень поражения растений инфекцией;
 k_f — степень повреждения растений заморозком.

Для определения оценки степени влияния агрометеорологических условий декады (или любого другого рассматриваемого периода) на формирование урожая необходимо [194, 196, 202]:

1) провести по модели расчет динамики формирования биомассы зерна (клубней) при средних многолетних агрометеорологических условиях: готовится массив исходных данных, а также определяются средние многолетние значения метеорологических элементов за каждый день вегетационного периода, декадных запасов продуктивной влаги, осуществляется расчет характеристик динамики формирования урожая;

2) провести по модели расчет динамики биомассы вегетативных и репродуктивных органов в текущем году: от даты появления всходов (возобновления вегетации) до момента проведения расчетов берутся фактические данные, характеризующие агрометеорологические условия, за остальную часть вегетационного периода (до созревания) берутся средние многолетние значения.

В следующую декаду на момент оценки берутся опять фактические данные (от даты всходов), а условия последующего периода учитываются по средним многолетним данным и т. д. В итоге такого расчета условия каждой декады будут оценены с учетом сложившихся условий предшествующего периода на фоне последующих условий периода вегетации, принимаемых как средние многолетние. В течение вегетационного периода будет рассчитана биомасса зерна (клубней) с учетом фактических условий первой декады вегетации, первой — второй декад, первой — третьей декад и т. д.;

3) сопоставить рассчитанную с учетом фактических данных, характеризующих агрометеорологические условия рассматриваемого периода, биомассу зерна (клубней) с биомассой зерна (клубней), рассчитанной по средним многолетним данным.

Для оценки агрометеорологических условий произрастания культуры в первую декаду вегетации принята следующая формула:

$$C_1 = \hat{m}_{g(p)1} / \bar{m}_{g(p)1}, \quad (7.2)$$

где C_1 — оценка агрометеорологических условий первой декады вегетации; $\hat{m}_{g(p)1}$ — биомасса зерна (клубней), рассчитанная по модели с учетом фактических данных, характеризующих агрометеорологические условия первой декады вегетации, на фоне последующих климатических условий, $г \cdot м^{-2}$.

Оценка второй и всех последующих декад вегетации проводится по формуле

$$C_i = \frac{\hat{m}_{g(p)i}}{\hat{m}_{g(p)i-1}}, \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad (7.3)$$

где $\hat{m}_{g(p)i}$ — биомасса зерна (клубней), рассчитанная по модели с учетом фактических данных на дату оценки, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$; $\hat{m}_{g(p)i-1}$ — биомасса зерна (клубней), рассчитанная по модели при оценке предшествующего периода, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$.

По мере поступления новой информации о развитии сельскохозяйственных культур часть параметров моделей корректируется. При прохождении фаз колошение — цветение имеется возможность, подставив в выражения (3.3), (4.18) и (4.25) соответствующие этим фазам в конкретном году суммы температур, скорректировать параметры этих выражений, описывающих изменения интенсивности фотосинтеза и дыхания в онтогенезе $\alpha_{\Phi i}$ и α_{Ri} , функции периода вегетативного и репродуктивного роста β_i и v_i .

Таким образом, функции $\alpha_{\Phi i}$, α_{Ri} , β_i и v_i будут адаптивными, изменяющими свои параметры в каждом конкретном году в зависимости от суммы температур, накопившихся на фазу колошения (выметывания, бутонизации).

Известно, что сумма температур за период всходы — колошение не является в строгом смысле постоянной величиной и от года к году претерпевает изменения, иногда довольно значительные. Использование в таких случаях осредненных параметров описанных выше функций может привести к погрешностям в расчетах. Особенно это относится к расчету биомассы репродуктивных органов, которая при фактически меньших суммах температур на фазу колошения будет занижена и при фактически больших суммах температур на эту фазу соответственно завышена.

Адаптивным параметром моделей зерновых культур является также максимально возможная биомасса зерна $m_{g, \max}$, которая корректируется по мере определения в течение вегетации элементов продуктивности колоса и густоты стояния продуктивного стеблестоя.

7.3. Методы оценки условий произрастания сельскохозяйственных культур на основе декадной агрометеорологической информации

Переход на декадную информацию позволяет вести расчеты по модели как с помощью ЭВМ, так и малой вычислительной техники. Реализация количественных методов оценки агрометеорологических условий должна осуществляться не только в бюро погоды, где есть ЭВМ, но и в областных гидрометбюро. А это означает, что надо рассчитывать на минимальные вычислительные возможности.

Исходя из анализа чувствительности моделей при переходе от расчетов с использованием суточной информации [196, 198, 199]

к расчетам на основе декадной информации сделан ряд упрощающих предположений [202, 203].

В качестве фотосинтезирующего органа рассматриваются только листья, что упрощает процедуру расчета суммарного фотосинтеза и ассимилирующей поверхности.

Средний суточный за декаду прирост биомассы посева ($\Delta M/\Delta t$) определяется разностью между фотосинтезом листьев Φ и дыханием:

$$\frac{\Delta M^j}{\Delta t} = \Phi^j - R^j, \quad (7.4)$$

где R — дыхание, определяемое для всего растения в целом:

$$R^j = \alpha_R^j (c_m \tilde{M}^j + c_G \Phi^j). \quad (7.5)$$

Все параметры, являющиеся функциями суммы температур (α_Φ , α_R , β_i , v_i), рассчитываются как средние для рассматриваемой декады.

Рост отдельных органов описывается системой уравнений вида:

$$\begin{aligned} m_i^{j+1} &= m_i^j + \left(\beta_i^j \frac{\Delta M^j}{\Delta t} - v_i^j \tilde{m}_i^j \right) n, \\ m_p^{j+1} &= m_p^j + \left(\beta_p^j \frac{\Delta M^j}{\Delta t} + \sum_i^{l, s, r} v_i^j \tilde{m}_i^j \right) n, \\ m_g^{j+1} &= m_g^j + \left(\frac{\Delta m_{g, \max}^j}{\Delta t} \frac{\Delta m_p^j / \Delta t}{k_g + \Delta m_p^j / \Delta t} \right) n, \end{aligned} \quad (7.6)$$

где n — длительность рассматриваемого периода, сут.

При расчетах по такой модели отпадает необходимость расчета влагозапасов между сроками наблюдений и можно воспользоваться суммарными значениями влагозапасов. Несколько сокращается объем начальных данных и очень существенно (в 12 раз) сокращается объем необходимой для расчетов агрометеорологической информации, хотя при этом возрастает средняя относительная ошибка расчетов по сравнению с расчетами на основе суточной информации. Для площади ассимилирующей поверхности она составляет 14—22 %, для биомассы репродуктивных органов — 18—27 % (табл. 7.2).

Для выполнения расчетов по модели задается декадная агрометеорологическая информация [202—204]:

- 1) \bar{T}_A , \bar{T}_{\max} — средняя суточная и максимальная за декаду температура воздуха;
- 2) SS — среднее за день число часов солнечного сияния;
- 3) W — запасы продуктивной влаги в полуметровом слое почвы.

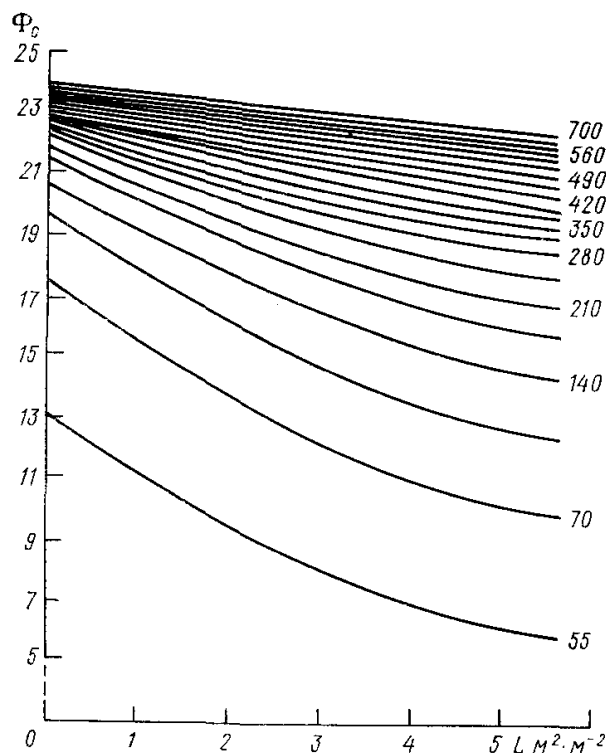
Очень важным с точки зрения массового применения в оперативной работе является то, что переход на декадную информа-

Таблица 7.2. Средняя относительная ошибка (%) расчета относительной площади листьев и биомассы репродуктивных органов на основе декадной агрометеорологической информации. По данным опытов, проведенных в Подмоскowie, 1976—1979 гг.

Культура, сорт	Ошибка расчета, %	
	относительной площади листьев	биомассы репродуктивных органов
Озимая пшеница, Мироновская 808	14 (27)	18 (16)
Яровой ячмень, Московский 121	19 (24)	25 (14)
Овес, Львовский 78	22 (21)	27 (12)
Картофель, Детскосельский	18 (29)	21 (23)

Примечание. В скобках указано число измерений.

цию позволяет вести расчеты по модели не только с помощью ЭВМ, но и с помощью малой вычислительной техники. Для этой



цели получены необходимые таблицы и номограммы, упрощающие процедуру расчетов [202, 203].

Как и любые вспомогательные расчетные материалы, эти таблицы достаточно объемны, а ограниченный объем книги не позволяет привести их полностью. В качестве примера некоторые из вспомогательных материалов приводятся на рис. 7.1 и в табл. 7.3—7.5

Рис. 7.1. Номограмма для расчета интенсивности фотосинтеза I^0 озимой пшеницы при оптимальных условиях тепло- и влагообеспеченности в реальных условиях освещенности.

Цифры в поле рисунка — интенсивность фотосинтеза I^0 (Вт · м⁻²).

в сокращенном виде. В полном объеме они приведены в «Методическом пособии по оценке агрометеорологических условий формирования урожайности озимой пшеницы озимой ржи в Нечерноземной зоне РСФСР» [202], а также в «Методическом пособии по составлению агрометеорологического прогноза средней областной урожайности картофеля на ЕТ СССР» [203]. Кроме приведенных в табл. 7.3—7.5 данных, в число этих материалов входят также следующие вспомогательные таблицы и графики:

1) значения параметра γ_{Φ} формулы (2.2) в зависимости от запасов влаги в слое почвы 0,5 м и наименьшей влагоемкости;

Таблица 7.3. Пример расчета первого слагаемого формулы (2.36) по данным о числе часов солнечного сияния SS

SS ч	12,66 SS ^{1,31}	SS	12,66 SS ^{1,31}	SS ч	12,66 SS ^{1,31}	SS ч	12,66 SS ^{1,31}
1,0	12,66	4,1	80,38	12,0	328,21	15,1	443,50
1,1	14,34	4,2	82,96	12,1	331,80	15,2	447,35
1,2	16,08	4,3	85,56	12,2	335,40	15,3	451,21
1,3	17,85	4,4	88,18	12,3	339,01	15,4	455,07
1,4	19,67	4,5	90,81	12,4	342,62	15,5	458,95
1,5	21,53	4,6	93,46	12,5	346,24	15,6	462,83
1,6	23,43	4,7	96,13	12,6	349,88	15,7	466,72
1,7	25,37	4,8	98,82	12,7	353,52	15,8	470,62
1,8	27,34	4,9	101,53	12,8	357,17	15,9	474,53
1,9	29,35	5,0	104,25	12,9	360,83	16,0	478,44
2,0	31,39	5,1	106,99	13,0	364,50	16,1	482,36
.	.	.	.	13,1	368,19	16,2	486,29
.	.	.	.	13,2	371,86	16,3	490,22
.	.	.	.	13,3	375,56	16,4	494,17

Таблица 7.4. Значения второго слагаемого формулы (2.36) 315 (A+B)^{2,1}. Июль

Географическая широта станции	Декада			Географическая широта станции	Декада		
	1	2	3		1	2	3
50°	244,56	238,26	227,91	55°30'	217,29	210,39	199,19
50°30'	242,20	235,84	225,39	56°	214,69	207,74	196,49
51°	239,82	233,39	222,85	56°30'	212,06	203,08	193,77
51°30'	237,41	230,92	220,29	57°	209,42	202,40	191,04
52°	234,97	228,42	217,71	57°30'	206,76	199,71	188,31
52°30'	232,51	225,91	215,12	58°	204,09	197,01	185,56
53°	230,03	223,37	212,50	58°30'	201,41	194,29	182,81
53°30'	227,52	220,81	209,87	59°	198,71	191,56	180,04
54°	224,99	218,24	207,22	59°30'	196,00	188,83	177,28
54°30'	222,45	215,64	204,56	60°	193,27	186,08	174,50
55°	219,88	213,02	201,88				

- 2) данные для построения кривой ψ_{Φ} по формуле (2.2);
- 3) данные для построения эталонных графиков α_{Φ} , α_R , β_L , β_S , β_T и β_P ;
- 4) графики для расчета средней дневной температуры воздуха;
- 5) значения функций v_L , v_S и v_T , а также целый ряд других материалов.

В указанных выше методических пособиях [202, 203] последовательно описана вся процедура расчетов. Для каждой таблицы, содержащей описание вычислений какого-либо параметра, приведена соответствующая расчетная таблица, которая содержит конкретный пример расчета. Вспомогательные таблицы и номограммы позволяют осуществить целый ряд промежуточных расчетов, что существенно сокращает затраты времени на проведение

расчета оценок агрометеорологических условий произрастания сельскохозяйственных культур в оперативном режиме.

Таблица 7.5. Начальные значения биомассы отдельных органов ($\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$) и относительной площади ассимилирующей поверхности ($\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$) картофеля на декаду всходов в зависимости от густоты стояния растений

Характеристика	Густота стояния растений на декаду всходов, раст. $\cdot \text{м}^{-2}$						
	2,0	2,5	3,0	...	7,0	7,5	8,0
Масса листьев m_l	1,02	1,31	1,57	...	3,66	3,92	4,18
Масса стеблей m_s	0,32	0,40	0,47	...	1,11	1,18	1,26
Масса корней m_r	1,20	1,50	1,80	...	4,20	4,50	4,80
Масса клубней m_p	0,00	0,00	0,00	...	0,00	0,00	0,00
Масса всего растения картофеля M	2,54	3,21	3,84	...	8,97	9,60	10,24
Содержание сухих веществ в материнском клубне M_c	35,00	43,75	52,50	...	122,5	131,25	140,0
Относительная площадь ассимилирующей поверхности L	0,027	0,034	0,041	...	0,096	0,103	0,110

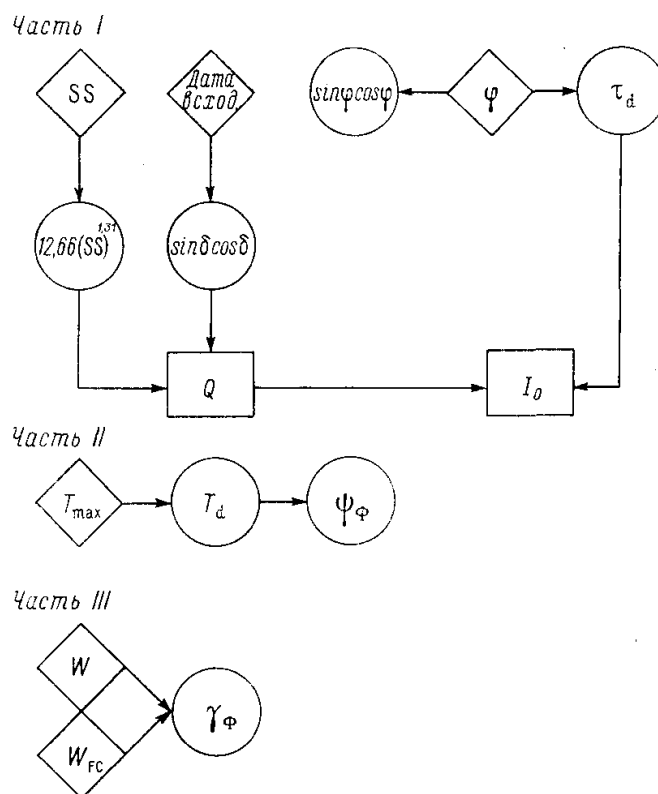


Рис. 7.2. Схема расчетов по модели с помощью малой вычислительной техники (части I, II и III).

Общая схема расчетов по модели на основе декадной агрометеорологической информации с помощью малой вычислительной техники представлена на рис. 7.2 и 7.3. На схеме приняты следующие условные обозначения: ромбы — входная информация; круги — данные, определяемые по расчетным таблицам и графикам; прямоугольники — данные, которые рассчитываются с помощью малой вычислительной техники; стрелками указан порядок

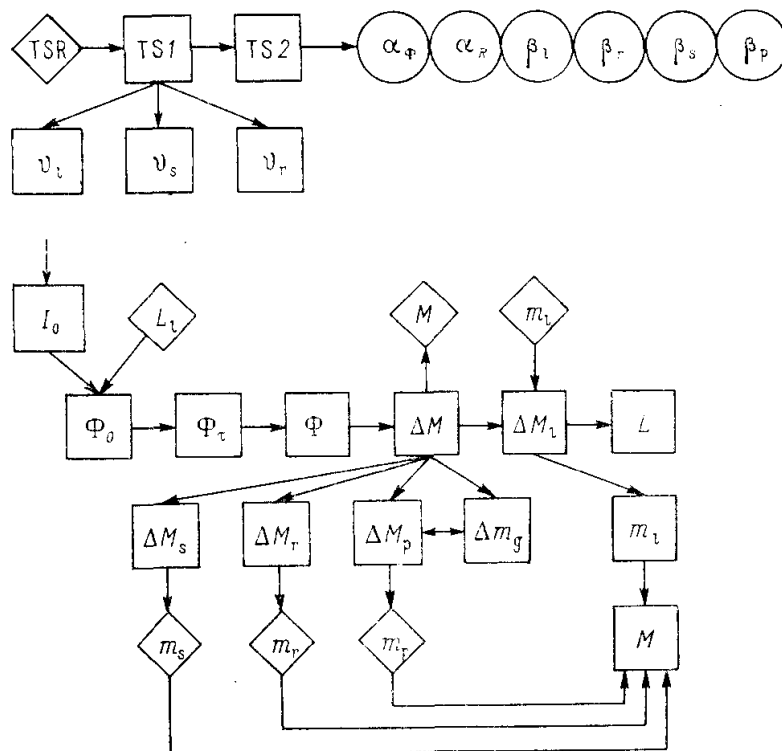


Рис. 7.3. Схема расчетов по модели с помощью малой вычислительной техники (часть IV).

проведения расчетов; условные обозначения величин приведены в тексте.

Оценка агрометеорологических условий произрастания сельскохозяйственных культур характеризует по существу только условия формирования биологического урожая, тогда как основным объектом агрометеорологического прогнозирования является уровень хозяйственного урожая.

Глава 8

МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ОСНОВНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Как уже указывалось ранее, современная методология агрометеорологического прогнозирования урожайности развивается на основе принципов и понятий, сформулированных М. С. Куликом,

Е. С. Улановой, А. В. Процеровым, Ю. И. Чирковым, К. В. Кириличевой, В. А. Моисейчик, А. П. Федосеевым.

Методы прогнозирования продуктивности озимой пшеницы, предложенные Куликом [104, 107] и Улановой [259, 262, 263], яровой пшеницы, разработанные Процеровым и Кириличевой [84, 214], кукурузы, созданные Чирковым [284, 286], трав, развитые Федосеевым [266], явились той научно-методической базой, на основе которой были выполнены все последующие исследования в этой области агрометеорологических прогнозов, развиты новые подходы к решению этой проблемы.

Не останавливаясь на детальном рассмотрении результатов этих исследований, представление о современном состоянии которых дают работы [105, 264, 287, 308], а также проведенный нами анализ [159, 197], укажем только основные разработки, выполненные по отдельным культурам.

Среди исследований, посвященных созданию методов прогнозирования урожайности озимых и ранних яровых зерновых культур, необходимо выделить работы по прогнозированию урожая озимой пшеницы [11, 62, 131, 313, 371, 385], озимой ржи [60, 245], озимого ячменя [50], яровой пшеницы [7, 209, 231, 307, 335], ярового ячменя [58, 68, 158, 175, 231] и овса [69, 168, 178], а также методы прогноза продуктивности зерновых культур на осушаемых землях [181, 193, 195]. Применительно к этим культурам разработки наиболее многочисленны.

Для поздних теплолюбивых крупяных и зернобобовых культур также предложены различные методы прогнозирования продуктивности этих культур. К ним относятся методы прогноза урожая кукурузы [59, 343], риса [6, 280], гречихи [77] и гороха [78].

Ведется создание методов прогнозирования урожая картофеля [121, 188, 275, 298, 386], сахарной свеклы [85, 94], льна [89], подсолнечника [125, 126, 128], хлопка [139, 140, 166], табака [98, 123], чая [124], цитрусовых [276], сеяных трав [51], а также сенокосов и пастбищ [9, 13, 48].

При разработке методов прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в качестве важнейших мы рассматривали проблемы оценки сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий формирования урожая, определения инерционных показателей, учета постоянно действующих факторов.

Исследования проводились как в рамках развития статистического [169, 172, 175, 177, 178, 179, 182, 184, 191], так и динамико-статистического [193, 195, 198, 199, 203, 204, 205] направления прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур.

8.1. Динамико-статистические методы прогнозирования урожайности

Урожайность сельскохозяйственных культур определяется уровнем культуры земледелия, почвенно-климатическими и погодными условиями района возделывания.

Временные ряды урожайности Y_t можно рассматривать как сумму двух слагаемых — детерминированной составляющей и случайных отклонений от нее [183, 188, 198, 199, 203]:

$$Y_t = f(t) + \varepsilon_t, \quad (8.1)$$

где $f(t)$ — некоторая неслучайная функция времени (тренд); ε_t — случайная составляющая временного ряда (случайный компонент).

Тенденция урожайности зависит от внедрения достижений науки и техники в практику, увеличения затрат технических средств, улучшения организации труда и внесения удобрений, изменения сортовой структуры посевов, мелиорации. Она является следствием постепенного улучшения культуры земледелия при среднем уровне почвенно-климатических условий. Отклонения урожайности от сложившейся тенденции определяются главным образом агрометеорологическими условиями вегетационного периода конкретных лет.

Прогноз урожайности можно делать с учетом обеих составляющих временного ряда: тренда — путем простой экстраполяции с помощью любого из статистических методов прогноза по одному временному ряду и отклонений от тренда — с помощью методов оценки агрометеорологических условий произрастания культуры.

Методология динамико-статистического прогнозирования урожая [204, 205] опирается, с одной стороны, на использование методов прогнозирования по одному временному ряду, широко используемых при прогнозировании экономических явлений, с другой стороны, — на методы оценки условий формирования урожая с помощью моделей продукционного процесса.

Применение методов прогнозирования по одному временному ряду хотя и предусматривает проведение исследований по выбору наиболее приемлемого подхода к экстраполяции тенденции урожайности, однако методология этих исследований хорошо разработана. Экстраполяция тенденции урожайности не вызывает больших затруднений.

Использование методов диагностики агрометеорологических условий произрастания сельскохозяйственных культур для оценки отклонений от тенденции урожайности, обусловленных влиянием погодных условий конкретных лет, позволяет решить две проблемы. Первая из них — это обычно возникающая при прогнозировании урожайности проблема комплексной оценки сложившихся агрометеорологических условий и исходного состояния посевов ко времени составления прогноза. Вторая проблема — это решение задачи согласования в единой схеме различных прогностических данных.

Эти основные положения делают возможным развитие более общих подходов к прогнозированию урожайности, позволяют, после оценки географической изменчивости параметров моделей

формирования урожая и проведения численных экспериментов, перейти к динамико-статистическому прогнозированию урожайности в различных почвенно-климатических зонах страны.

Разработка таких методов прогноза возможна только после проведения исследования случайного компонента временных рядов урожаев [183, 188] с целью проверки гипотезы о правильности выбора вида тренда, а также гипотезы о том, что случайный компонент представляет собой стационарный случайный процесс.

Исследование случайного компонента временных рядов урожайности. В качестве примера приведем оценку случайной компоненты временных рядов урожайности ярового ячменя и картофеля.

При правильном выборе тренда отклонения от него будут носить случайный характер.

Для проверки основной гипотезы (изменение случайной величины ε_t не связано с изменением времени) воспользуемся критерием серий, основанном на медиане ε_{med} выборки [270].

Для того чтобы исходный ряд представлял случайную выборку, протяженность $k_{\text{max}}(n)$ самой длинной серии (последовательность плюсов или минусов, полученных путем сопоставления каждого члена ряда с медианой) не должна быть слишком большой, а общее число серий $v(n)$ — слишком маленьким. Выборка признается случайной, если выполняются следующие неравенства (для 5 %-ного уровня значимости):

$$\begin{aligned} k_{\text{max}}(n) &< [3,3 (\lg n + 1)], \\ v(n) &> \left[\frac{1}{2} (n + 1 - 1,96 \sqrt{n - 1}) \right]. \end{aligned} \quad (8.2)$$

Чтобы получить левые части неравенств (8.2) из отклонений от тренда $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$, образуем для каждой из рассматриваемых областей вариационный ряд $\varepsilon^{(1)}, \varepsilon^{(2)}, \dots, \varepsilon^{(n)}$, где $\varepsilon^{(1)}$ — наименьшее из всех отклонений, а ε_{med} — медиана этого вариационного ряда. Далее получим последовательность плюсов и минусов по следующему правилу. На i -м месте ($i = 1, 2, \dots, n$) ставится знак плюс, если i -е наблюдение в исходном ряду превосходит медиану, и знак минус, если оно меньше медианы. Если i -е наблюдение равно медиане, оно опускается.

Данные расчета протяженности самой длинной серии $k_{\text{max}}(n)$ и общее число серий $v(n)$ для каждой области приведены в табл. 8.1. Сравнение левых и правых частей неравенств (8.2) показывает, что оба неравенства справедливы (см. табл. 8.1).

Гипотеза о случайном характере отклонений уровней временного ряда урожайности от тренда принимается. Таким образом, возрастающая тенденция урожайности характеризующая уровень культуры земледелия при средних почвенно-климатических условиях, исключена из временных рядов верно.

Проверим гипотезу стационарности случайной компоненты временных рядов урожайности [270].

Таблица 8.1. Оценка правильности выбора тренда

Область, республика	Культура	$k_{\max}^{(n)}$	$v(n)$	$3,3 (\lg n + 1)$	$\frac{1}{2} (n+1 - 1,96 \sqrt{n-1})$
Ивановская обл.	Яровой ячмень	5	10	7,59	6,23
Вологодская обл.	Картофель	4	11	7,59	6,23
Калужская обл.	Картофель	4	12	7,59	6,23
Марийская АССР	Картофель	3	15	7,59	6,23

Основным условием стационарности случайного процесса является условие зависимости автокорреляционной функции только от величины сдвига разности аргументов $t_i - t_j = \tau$.

Естественно, что для сравнительно коротких временных рядов урожайности проверка этого условия может быть только приближенной.

Для случайной компоненты ε_t ($t = 1, 2, 3, \dots, n$) найдем значение автокорреляционной функции $r_1^{(n)}, r_2^{(n)}, \dots, r_\tau^{(n)}$. Затем исключим первое наблюдение и вычислим новую автокорреляционную функцию $r_1^{(n-1)}, r_2^{(n-1)}, \dots, r_\tau^{(n-1)}$. Подобным образом исключим $k \rightarrow k$ ($k = 0, 1, 2, \dots, k$) наблюдений и вычислим значение $(k+1)$ автокорреляционной функции. В итоге получим τ групп коэффициентов автокорреляции, в каждую из которых будет входить $(k+1)$ коэффициент.

В табл. 8.2—8.5 представлены значения автокорреляционных функций для каждой области соответственно для 20, 19, 18, 17, 16, 15 и 14 наблюдений.

Для проверки однородности коэффициентов автокорреляции, входящих в τ -ю группу для каждого $r_\tau^{(n-k)}$, были рассчитаны значения Z -критерия по формуле

$$Z_{\tau k} = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + r_\tau^{(n-k)}}{1 - r_\tau^{(n-k)}}. \quad (8.3)$$

Далее для каждого сдвига была получена величина

$$\bar{Z}_\tau = \frac{\sum_{k=0}^k Z_{\tau, k}}{k+1}. \quad (8.4)$$

Доказано [12], что величина

$$\sum_{k=0}^k \frac{(Z_{\tau k} - \bar{Z}_\tau)^2}{1/(n-k-3)} \quad (8.5)$$

распределена как χ^2 с k степенями свободы.

Верхняя граница для χ^2 с шестью степенями свободы при 5 %-ном уровне значимости равна 12,59. Данные табл. 8.2—8.5 показывают, что все вычисленные значения χ^2 меньше этого

**Таблица 8.2. Проверка стационарности отклонений урожайности от тренда.
Ивановская область, яровой ячмень**

Количество наблюдений	Параметр	Сдвиг							
		1	2	3	4	5	6	7	8
20	r	0,300	0,345	0,076	0,118	-0,335	-0,142	-0,192	0,048
	Z	0,308	0,359	0,074	0,119	-0,349	-0,143	-0,195	0,048
19	r	0,280	0,340	0,116	0,046	-0,322	-0,141	-0,338	0,016
	Z	0,288	0,354	0,115	0,047	-0,334	-0,142	-0,352	0,015
18	r	0,268	0,361	0,075	0,039	-0,328	-0,211	-0,375	0,025
	Z	0,274	0,378	0,074	0,070	-0,341	-0,214	-0,395	0,024
17	r	0,280	0,332	0,088	0,074	-0,385	-0,235	-0,387	0,048
	Z	0,288	0,344	0,087	0,074	-0,406	-0,280	-0,408	0,048
16	r	0,301	0,333	0,090	0,100	-0,389	-0,247	-0,370	0,043
	Z	0,310	0,344	0,091	0,099	-0,409	-0,252	-0,388	0,043
15	r	0,342	0,350	0,018	0,068	-0,424	-0,448	-0,449	0,237
	Z	0,356	0,366	0,018	0,068	-0,453	-0,482	-0,484	0,241
	\bar{Z}	0,304	0,358	0,076	0,079	-0,382	-0,252	-0,375	0,070
	χ^2	0,054	0,007	0,007	0,052	0,159	1,063	0,726	0,456

**Таблица 8.3. Проверка стационарности отклонений урожайности от тренда.
Вологодская область, картофель**

Количество наблюдений	Параметр	Сдвиг						
		1	2	3	4	5	6	7
20	r	-0,124	0,246	0,558	-0,034	-0,156	-0,048	-0,226
	Z	-0,125	0,250	0,161	-0,034	-0,157	-0,048	-0,227
19	r	-0,084	0,191	0,201	-0,025	-0,201	-0,063	-0,127
	Z	-0,084	0,193	0,203	-0,025	-0,204	-0,063	-0,127
18	r	-0,023	0,169	0,222	-0,056	-0,207	-0,174	-0,258
	Z	-0,023	0,172	0,226	-0,056	-0,210	-0,131	-0,264
17	r	-0,010	0,178	0,205	-0,050	-0,093	-0,038	-0,163
	Z	-0,010	0,179	0,209	-0,050	-0,093	-0,038	-0,164
16	r	-0,016	0,198	0,218	-0,016	-0,178	-0,106	-0,146
	Z	-0,016	0,199	0,222	-0,016	-0,180	-0,107	-0,147
15	r	-0,015	0,200	0,225	-0,011	-0,180	-0,112	-0,153
	Z	-0,015	0,203	0,229	-0,011	-0,182	-0,113	-0,154
14	r	-0,007	0,235	0,274	-0,019	-0,202	-0,103	-0,146
	Z	-0,008	0,238	0,280	-0,019	-0,205	-0,104	-0,147
	\bar{Z}	-0,040	0,205	0,218	-0,030	-0,176	-0,086	-0,159
	χ^2	0,197	0,075	0,105	0,025	0,142	0,113	0,221

**Таблица 8.4. Проверка стационарности отклонений урожайности от тренда.
Калужская область, картофель**

Количество наблюдений	Параметр	Сдвиг						
		1	2	3	4	5	6	7
20	r	0,338	—0,028	0,083	—0,204	—0,580	—0,492	—0,339
	Z	0,352	—0,028	0,083	—0,207	—0,602	—0,539	—0,353
19	r	0,351	—0,003	0,087	—0,241	—0,584	—0,531	—0,369
	Z	0,356	—0,003	0,087	—0,246	—0,668	—0,647	—0,387
18	r	0,359	—0,003	0,093	—0,249	—0,594	—0,543	—0,410
	Z	0,376	—0,003	0,091	—0,255	—0,683	—0,609	—0,436
17	r	0,376	—0,047	0,130	—0,286	—0,650	—0,372	—0,285
	Z	0,349	—0,047	0,131	—0,294	—0,776	—0,390	—0,294
16	r	0,376	—0,046	0,131	—0,292	—0,659	—0,379	—0,300
	Z	0,394	—0,046	0,131	—0,304	—0,790	—0,399	—0,310
15	r	0,410	—0,061	0,133	—0,144	—0,574	—0,435	—0,338
	Z	0,436	—0,061	0,135	—0,145	—0,653	—0,466	—0,352
14	r	0,424	—0,059	0,054	—0,213	—0,592	—0,458	—0,365
	Z	0,452	—0,059	0,052	—0,216	—0,681	—0,494	—0,383
	\bar{Z}	0,396	—0,035	0,101	—0,238	—0,693	—0,506	—0,359
	χ^2	0,118	0,050	0,050	0,231	0,392	0,853	0,199

**Таблица 8.5. Проверка стационарности отклонений урожайности от тренда.
Марийская АССР, картофель**

Количество наблюдений	Параметр	Сдвиг						
		1	2	3	4	5	6	7
20	r	—0,275	—0,054	0,256	—0,288	—0,202	—0,085	—0,069
	Z	—0,282	—0,054	0,262	—0,296	—0,205	—0,085	—0,069
19	r	—0,230	—0,019	0,267	—0,332	—0,193	—0,060	—0,098
	Z	—0,234	—0,019	0,274	—0,334	—0,196	—0,060	—0,099
18	r	—0,153	—0,017	0,305	—0,376	—0,253	—0,045	—0,257
	Z	—0,154	—0,017	0,316	—0,396	—0,259	—0,045	—0,263
17	r	—0,184	—0,032	0,371	—0,379	—0,303	—0,125	—0,096
	Z	—0,186	—0,032	0,390	—0,399	—0,313	—0,126	—0,096
16	r	—0,186	—0,031	0,378	—0,387	—0,302	—0,140	—0,100
	Z	—0,188	—0,031	0,399	—0,408	—0,313	—0,141	—0,100
15	r	—0,184	—0,025	0,382	—0,376	—0,286	—0,148	—0,117
	Z	—0,186	—0,025	0,403	—0,396	—0,294	—0,149	—0,120
14	r	—0,194	—0,022	0,353	—0,433	—0,304	—0,172	—0,124
	Z	—0,196	—0,022	0,369	—0,463	—0,314	—0,174	—0,125
	\bar{Z}	—0,204	—0,028	0,345	—0,384	—0,270	—0,111	—0,117
	χ^2	0,168	0,015	0,323	0,255	0,244	0,194	0,405

значения. Исходя из этого гипотеза об однородности коэффициентов автокорреляции для каждого сдвига может быть принята. Следовательно, случайная компонента временных рядов урожайности представляет собой стационарный случайный процесс. Он протекает приблизительно однородно, и с течением времени ни средняя амплитуда, ни характер случайных колебаний урожайности вокруг линии тренда не будет обнаруживать существенных изменений.

Экстраполяция тенденции урожайности. В методах прогноза по одному временному ряду делается предположение относительно вида тренда; форма тренда и его параметры определяются в результате подбора наилучшей (по какому-либо из имеющихся статистических критериев) функции из числа имеющихся.

По сравнению с этими методами метод гармонических весов, предложенный З. Хельвигом [270, 336] для прогнозирования экономических показателей, имеет то преимущество, что здесь необходимости в таких предположениях нет.

В качестве некоторого приближения $\bar{f}(t)$ истинного тренда $f(t)$ принимается ломаная линия, сглаживающая заданное число точек временного ряда Y_t .

Изменяющееся положение отдельных отрезков ломаной линии, представляющей тренд, описывает непрерывные изменения в изучаемом процессе, т. е. его отдельные фазы.

Для определения отдельных фаз движения скользящего тренда выберем число $k < n$ и найдем с помощью метода наименьших квадратов уравнения линейных отрезков:

$$Y_i(t) = q_i + S_i t, \quad i = 1, 2, \dots, n - k + 1, \quad (8.6)$$

причем

$$\text{для } i = 1 \quad t = 1, 2, \dots, k;$$

$$\text{для } i = 2 \quad t = 2, 3, \dots, k + 1;$$

$$\text{для } i = n - k + 1, \quad t = n - k + 1, n - k + 2, \dots, n.$$

Определим значение каждой функции $Y_i(t)$ в точках:

$$t = i + n - 1, \quad n = 1, 2, \dots, k.$$

Отберем среди этих значений те, для которых $t = i$, и обозначим через $Y_i(t)$ значения функции $Y_i(t)$ для $t = i$.

Пусть таких значений будет g_i . Средние можно определить по выражению

$$\bar{Y}_j(t) = \frac{1}{g_j} \sum_{i=1}^{g_j} Y_i(t), \quad j = 1, 2, \dots, g_i. \quad (8.7)$$

Для построения прогноза по методу гармонических весов необходимо, чтобы выполнялись некоторые предпосылки [270].

1. Временной интервал, в котором рассматривается экономический процесс, должен быть достаточно продолжительным, чтобы

внутри этого интервала можно было проследить закономерности изменения изучаемого процесса; за анализируемый период происходят только эволюционные, а не революционные изменения.

2. Временная автокорреляционная функция рассматриваемого ряда должна уменьшаться с ростом τ , а отклонения от скользящего тренда должны представлять собой стационарный в широком смысле случайный процесс.

Метод гармонических весов учитывает все эти предпосылки, а расчеты по этому методу осуществляются следующим образом. Приросты ω_{t+1} функции $f(t)$ определяются следующим образом:

$$\omega_{t+1} = f(t+1) - f(t) = \bar{Y}_{t+1} - \bar{Y}_t. \quad (8.8)$$

Затем вычисляется средняя приростов:

$$\bar{\bar{W}} = \sum_{t=1}^{n-1} v_{t+1}^n W_{t+1}, \quad (8.9)$$

где v_{t+1}^n — коэффициенты, удовлетворяющие следующим условиям:

$$v_{t+1}^n > 0, \quad t = 1, 2, \dots, n-1, \quad (8.10)$$

$$\sum_{t=1}^{n-1} v_{t+1}^n = 1. \quad (8.11)$$

Выражение (8.9) позволяет придавать более поздним наблюдениям бóльшие веса. Если самые ранние наблюдения имеют вес

$$m_2 = \frac{1}{n-1}, \quad (8.12)$$

то вес информации m_3 , относящейся к следующему моменту времени, будет определяться как

$$m_3 = m_2 + \frac{1}{n-2}. \quad (8.13)$$

Таким образом, ряд весов определяется по уравнению

$$m_{t+1} = m_t + \frac{1}{n-t}, \quad t = 2, 3, \dots, n-1 \quad (8.14)$$

с начальной величиной, выраженной уравнением (8.12).

Экстраполяцию тенденции урожайности проведем по выражению

$$Y_{t+1} = Y_t + \bar{\bar{W}}. \quad (8.15)$$

Прогнозирование средней областной урожайности зерновых культур. Как уже отмечалось ранее, тренд урожайности является следствием постепенного улучшения культуры земледелия при среднем уровне почвенно-климатических условий. Изменение же случайной компоненты временных рядов урожайности определяется погодными условиями конкретных лет.

Экстраполяцию тенденции урожайности на прогнозируемый год Y_{t+1} можно осуществить [198, 199, 204, 205] с помощью метода гармонических весов.

Для определения отклонения урожайности от тренда в прогнозируемом году необходимо оценить степень отличия складывающихся погодных условий года от климатических условий, на фоне которых формируется тенденция урожайности.

Степень отличия определяют с помощью методов оценки агрометеорологических условий формирования урожая сельскохозяйственных культур по выражению, аналогичному (7.1). Оно представляет собой осредненное по территории отношение \bar{C} биомассы зерна (клубней), рассчитанной с помощью модели по данным $\hat{m}_{g(p)}$, характеризующим сложившиеся агрометеорологические условия и исходное состояние посевов на время составления прогноза, к биомассе зерна (клубней), рассчитанной по модели на основе многолетних данных $\bar{m}_{g(p)}$:

$$\bar{C} = \frac{\hat{m}_{g(p)}}{\bar{m}_{g(p)}}. \quad (8.16)$$

Для прогнозирования урожая Y_{π} предложено [198, 199, 204, 205] выражение

$$Y_{\pi} = Y_{t+1} \bar{C}. \quad (8.17)$$

Составление прогноза урожайности как по культуре озимой пшеницы, так и по яровому ячменю и овсу проводится после наступления у растений фазы появления нижнего стеблевого узла соломины над поверхностью почвы, что позволяет по данным агрометеорологических наблюдений уточнить параметры модели, характеризующие максимально возможную массу зерна $m_{g, \max}$. Эта величина задается исходя из реальной (наблюдаемой в определенные моменты вегетации) густоты стояния N_s , потенциально возможных продуктивной кустистости S_p , размеров колоса и массы 1000 зерен, присущих сорту. Возможности такого уточнения больше для культуры озимой пшеницы. После наступления фазы появления нижнего узла соломины озимой пшеницы имеются данные не только о густоте стеблестоя, но и о числе колосков в колосе n_p .

Уточнение прогноза урожайности всех культур осуществляется после наступления фазы колошения (выметывания). В эту фазу и у озимой пшеницы, и у ярового ячменя и овса определяется число колосконосных стеблей, а также элементы продуктивности колоса — число развитых и недоразвитых колосков в колосе. Это позволяет еще раз скорректировать параметр, характеризующий максимально возможную массу зерна, и осуществить расчеты по модели с целью получения оценки условий формирования урожая зерновых культур от начала вегетации (всходов) до времени составления прогноза.

Прогнозирование средней областной урожайности картофеля осуществляется на тех же принципах, что и прогнозирование урожайности зерновых культур. Прогноз урожайности рассматривается [198, 199] как сумма двух прогнозов: прогноза тенденции урожайности и оценки случайных отклонений от нее.

Экстраполяция тенденции средней областной урожайности картофеля проводится [198, 199] с помощью метода гармонических вессов.

Оценка обусловленного воздействием погодных условий отклонения урожайности картофеля от тенденции осуществляется с помощью методов оценки условий произрастания этой культуры, изложенных в гл. 7, по выражению (7.1).

Прогнозирование средней областной урожайности картофеля проводится в два срока.

В этом случае возможности корректировки параметров модели несколько ограничены и сводятся к уточнению по данным наблюдений (после появления соцветий у растений) густоты стояния посадок картофеля, которое проводится через изменение начальных значений биомассы листьев, стеблей, корней и площади ассимилирующей поверхности. Значения параметров, характеризующих состояние посадок картофеля на начало расчетов, определяются как произведение соответствующих значений «стандартного» растения (см. табл. 7.1) на густоту стояния.

Прогнозирование средней областной урожайности картофеля осуществляется по выражению (8.17).

Для культуры картофеля весьма важным при прогнозировании урожая является оценка агрометеорологических условий уборки урожая и возможных потерь урожая клубней при уборке, обусловленных неблагоприятными погодными условиями.

Исследования влияния агрометеорологических условий на полноту уборки урожая картофеля впервые были начаты Е. А. Цубербиллер на Обнинском экспериментальном агрометеорологическом полигоне Института экспериментальной метеорологии. Некоторые результаты этих работ были опубликованы в виде агрометеорологических рекомендаций по учету погодных условий при выращивании картофеля [279]. Большая часть их осталась неопубликованной.

Эти исследования были нами продолжены [171, 173, 176, 201].

Для извлечения всех клубней картофеля приходится подкапывать довольно большой по объему и массе пласт почвы. Об энергоемкости такой операции говорит, например, такой факт: в каждую секунду на элеватор однорядной уборочной машины поступает до 100 кг и более почвы, при этом содержащиеся в ней клубни составляют по массе всего 2—3 % [43]. Таким образом, при уборке картофеля на каждом гектаре машиной перемещается 700—1000 т почвы и всего лишь 15—16 т картофеля.

Физико-механические свойства этой перемещающейся массы определяют качество работы подкапывающих и сепарирующих

рабочих органов картофелеуборочных машин и, следовательно, полноту уборки урожая клубней.

Максимальные потери урожая (45—50 %) наблюдаются при запасах продуктивной влаги в пахотном слое в пределах 10—15 мм [171]. При таких условиях лемех картофелекопателя с трудом проникает в почву, имеет неравномерный ход, часто ползет по поверхности, повреждая клубни и оставляя их в почве. Появляются комки и глыбы высокой прочности, плохо поддающиеся сепарированию и повреждающие клубни. По данным [161, 162], при обработке почвы с влажностью 10—12 % от абсолютно сухой массы верхнего слоя почвы количество крупных глыб более 5 см в диаметре было 76 %, а при обработке почвы с влажностью 18—20 % — всего 19,8 %.

Мелкие частицы почвы при известных условиях могут быть отделены от клубней полностью. Что касается комков, то те из них, которые по размерам равны клубням или больше их, трудно отделимы.

Рост запасов влаги способствует снижению потерь урожая клубней картофеля при уборке. Минимальные потери урожая (от 2 до 20 %) имеют место при запасах продуктивной влаги в пахотном слое почвы около 25—40 мм [171]. В этих условиях значительно уменьшаются потери урожая от неподкопанных клубней и потери клубней на поверхности почвы. Почва приобретает свойства, которые благоприятствуют процессу просеивания. Комки сравнительно легко разрушаются; частицы почвы не слипаются друг с другом, не прилипают к металлу и сравнительно легко разрушаются при встряхивании, сдавливании и ударах. Эти условия можно считать оптимальными для работы подкапывающих и сепарирующих рабочих органов картофелеуборочных машин, обеспечивающими максимальную полноту уборки урожая клубней.

При повышении влажности более 40 мм почва приобретает свойства пластичности и липкости. При механических воздействиях элементы почвы не разрушаются, а лишь изменяют свою форму (сплющиваются). Появление липкости приводит к залипанию просветов между прутками элеватора и колосниками грохотов. Залипание просветов в свою очередь ведет к снижению сепарации и вызывает рост потерь урожая клубней.

Полученные нами данные о влиянии влажности почвы на потери урожая при уборке хорошо согласуются с результатами исследований [63, 120, 164, 241].

Уравнение связи, описывающее влияние агрометеорологических условий на потери урожая клубней картофеля при уборке, имеет следующий вид [173]:

$$Y_m = 3,55W_v + 0,01W^2 - 0,95W + 1,42T_{\max} + 0,43\theta^2 - 1,38\theta - 1,20, \quad (8.18)$$

$$R = 0,73, \quad S_y = \pm 14,14, \quad n = 49,$$

где Y_m — потери урожая клубней картофеля при уборке, %; W_v —

влажность устойчивого завядания пахотного слоя почвы, %; W — запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы в декаду уборки, мм; T_{\max} — максимальная температура воздуха в день уборки, °C; θ — сумма осадков в день уборки, мм; R — множественный коэффициент корреляции; S_y — ошибка уравнения, %; n — длина ряда.

По уравнению (8.18) могут быть рассчитаны потери урожая клубней картофеля при уборке, обусловленные влиянием агрометеорологических условий на качество работы подкапывающих и сепарирующих органов картофелеуборочных машин.

Расчет потерь урожая клубней и оценка агрометеорологических условий проводится за каждый день с момента начала проведения уборочных работ [173, 201].

Так как информация, используемая при прогнозировании урожайности, всегда содержит ошибки измерения агрометеорологических и метеорологических элементов, а объективная сложность процесса формирования урожая не позволяет учесть все значимые факторы, то прогнозы урожайности не могут быть абсолютно точными.

Была проведена проверка оправдываемости динамико-статистических методов прогнозирования урожайности основных сельскохозяйственных культур в Нечерноземье. Она дала положительные результаты: оправдываемость прогнозов урожайности озимой пшеницы составляет 87 %, ярового ячменя — 84 %, овса — 82 % и картофеля — 91 %. Оправдываемость метода оценки агрометеорологических условий в период уборки урожая картофеля составляет 81 %.

8.2. Статистические методы прогноза урожайности ранних яровых зерновых культур в Нечерноземье

Как уже отмечалось ранее, продуктивность сельскохозяйственных культур определяется комплексом факторов, среди которых следует выделить постоянно действующие — уровень культуры земледелия, почвенно-климатические условия и изменяющиеся погодные условия района возделывания. Существует большое число способов учета в прогностических схемах первой группы факторов: определение отношений фактической урожайности к максимально возможной [50] и к средней многолетней [209], использование года-аналога [104, 193, 195] и отношения урожайности двух смежных лет [158], учет скользящей средней урожайности [231], а также расчет поправочного коэффициента [69].

При разработке статистических методов прогнозирования урожая ранних яровых зерновых культур в нечерноземной зоне Европейской части СССР, которая предшествовала созданию динамико-статистических методов, мы остановились на первом из этих способов — на определении отношения фактической урожайности к максимально возможной [175, 177—179, 182, 186, 191].

Были введены отношения фактической урожайности к максимально возможной Y/Y_{\max} . Вследствие того что величина Y_{\max} принята постоянной характеристикой климатических, агротехнических и почвенных условий каждой области, отношение дает возможность судить о влиянии на урожай метеорологических условий конкретного года.

Сев в лучшие сроки является одним из основных агротехнических факторов, обеспечивающих получение высоких урожаев яровых зерновых культур.

Яровой ячмень относят к культурам наиболее ранних сроков сева. Обычно ранние сроки сева ячменя связывают с биологической особенностью семян к прорастанию при низкой температуре и устойчивостью к весенним заморозкам.

В годы с ранней весной достаточно хорошо прослеживается обратная связь между средней за период массового сева ранних яровых зерновых культур температурой воздуха и средней областной урожайностью ярового ячменя [175, 179, 182, 186, 191].

Более высокий уровень температуры воздуха в этот период вызывает снижение урожая. Наибольшие урожаи наблюдаются при температуре воздуха в период сева около $8-10^{\circ}\text{C}$. С понижением температуры при достаточном увлажнении почвы увеличивается число и возрастает мощность корней, что положительно сказывается на уровне урожая.

Связь между урожайностью ярового ячменя и средней за период массового сева температурой воздуха в годы с ранней весной характеризуется коэффициентом корреляции $-0,353$ (приведенные здесь и далее коэффициенты корреляции значимы для 5 %-ного уровня).

Обычно в позднюю весну растения почти не испытывают недостатка влаги.

При поздней весне, когда продолжительность периода вегетации значительно сокращается, чем в более сжатые сроки будет проведен посев, тем меньше будут потери урожая в случае неблагоприятных условий уборки. Увеличение продолжительности периода массового сева с $10-12$ до $20-25$ дней вызывает снижение урожая (Y/Y_{\max}) с $0,8$ до $0,5-0,6$.

Связь средней областной урожайности с продолжительностью периода массового сева и датой его завершения характеризуется соответственно коэффициентами корреляции $-0,492$ и $-0,361$.

К началу весны в нечерноземной зоне наблюдается насыщение корнеобитаемого слоя почвы до наименьшей влагоемкости, что ежегодно обеспечивает потребность яровых во влаге до всходов. Высокая дневная температура воздуха в мае способствует интенсивному испарению и транспирации. Происходит снижение запасов продуктивной влаги в пахотном слое почвы, где в этот период расположена основная масса корней ярового ячменя. Связь отношения Y/Y_{\max} со средней температурой воздуха за период посев — всходы описывается нисходящей ветвью параболы. Для различных

типов весны эта связь характеризуется коэффициентами корреляции $-0,44 \dots -0,52$.

В период всходы — выход в трубку также наблюдается обратная связь урожая со средней температурой воздуха (коэффициенты корреляции $-0,50 \dots -0,53$). В этот период основная масса корней расположена в пахотном слое почвы. Повышенные температуры воздуха вызывают пересыхание пахотного горизонта. Связь урожая с запасами продуктивной влаги в пахотном слое почвы прямая; она характеризуется коэффициентами корреляции $0,48 \dots 0,67$.

Максимальные урожаи ярового ячменя имеют место при сочетании в период всходы — выход в трубку температуры воздуха около $10-12^{\circ}\text{C}$ и запасах продуктивной влаги в пахотном слое почвы $50-60$ мм. При таких условиях дружно проходит кущение, дополнительные побеги хорошо обеспечены влагой [175, 179].

Значительное снижение урожаев наблюдается при сочетании низких запасов влаги в пахотном слое почвы ($15-20$ мм) и высокой температуры воздуха (около $16-18^{\circ}\text{C}$) в рассматриваемый период. Последнее хорошо согласуется с данными А. П. Федосеева [267], который указывает, что резкое снижение урожаев ярового ячменя отмечается в годы с недостатком влаги в период кущения, который, как правило, сопровождается повышенными температурами (около $15-18^{\circ}\text{C}$). Этому соответствует низкая продуктивная кустистость (в среднем 1,2), при которой даже в годы с нормальными всходами формируется от 250 до 550 продуктивных стеблей.

Сопоставление урожайности (Y/Y_{\max}) овса со средней за период посев — выход в трубку температурой воздуха и средними запасами продуктивной влаги в пахотном слое почвы показало, что между ними существует достаточно тесная связь, характеризующаяся в первом случае отрицательным ($-0,41$), а во втором — положительным ($0,50$) коэффициентом корреляции. Полученные зависимости средних областных урожаев от средних по области агрометеорологических показателей хорошо согласуются с результатами исследований [177], проведенных по полученным для отдельных полей данным, а также с существующими представлениями о сущности процесса влияния условий среды на формирование всходов и закладку репродуктивных органов.

Повышенная чувствительность зерновых культур к иссушению пахотного горизонта в период кущение — колошение и особенно в период выхода в трубку давно установлена. Критическим периодом для ярового ячменя является период выхода в трубку — колошение [239]. В этот критический по отношению к влаге период, кроме образования корневой системы и интенсивного роста вегетативной массы, как известно, происходит закладка и развитие органов плодоношения.

Сопоставление урожая со средней температурой воздуха и средними запасами влаги в пахотном слое почвы в период выхода в трубку — колошение показало, что между ними существует довольно тесная связь (коэффициенты корреляции соответственно

от $-0,53$ до $-0,67$ и от $0,58$ до $0,69$). При недостатке влаги в почве (около 10 мм в пахотном слое) и повышенных температурах воздуха (средние за период около $17-18^{\circ}\text{C}$) наблюдается резкое снижение урожайности. Оно обусловлено тем, что при недостатке влаги в критический период существенно меняется весь ход физиологических процессов и обмена веществ, ограничивается рост, снижается число колосков и зерен в колосе, возрастает количество стерильных колосков [175, 179].

Условия влагообеспеченности периода выход в трубку — выметывание у овса более полно характеризуют запасы продуктивной влаги не пахотного, а полуметрового слоя почвы [177, 178]. Коэффициент корреляции связи отношения Y/Y_{\max} со средними запасами влаги в этом слое равен 0,54.

Напряженность термического режима отрицательно влияет на урожайность. Теснота связи отношения Y/Y_{\max} со средней температурой воздуха в период выхода в трубку — выметывание характеризуется коэффициентом корреляции $-0,45$. Как уже отмечалось, вследствие недостатка влаги в критический период и повышенного термического режима существенно изменяется весь ход физиологических процессов и обмена веществ и снижается число цветков в колосе.

Инерционность некоторых агрометеорологических факторов успешно используется при составлении долгосрочных прогнозов урожая сельскохозяйственных культур [104, 262, 266, 286]. Эти факторы сохраняют большое влияние на состояние растений в течение длительного периода и во многих случаях предопределяют уровень урожая.

Запасы продуктивной влаги в полуметровом слое почвы на фазу выметывание, обладающие значительной инерционностью, могут рассматриваться как главный фактор, который определяет будущие условия формирования урожая овса (число зерен в колосе и их абсолютный вес). Запасы продуктивной влаги около 10 мм определяют наименьшую величину Y/Y_{\max} . С увеличением влагозапасов урожайность овса растет, наибольшие значения отношения Y/Y_{\max} наблюдаются при запасах влаги в полуметровом слое почвы около 90—100 мм [177, 178]. Теснота связи отношения Y/Y_{\max} с запасами влаги характеризуется коэффициентом корреляции 0,56.

Вторым инерционным фактором является состояние самой культуры.

Высота растений характеризует состояние растений и является довольно хорошим показателем реакции растений на агрометеорологические условия.

Для сопоставления величины Y/Y_{\max} с высотой растений были рассчитаны средние взвешенные с учетом сортовой структуры посевов каждой области значения высоты растений ячменя и овса. Между величиной Y/Y_{\max} и средней по области высотой растений существует прямая связь (коэффициент корреляции составляет 0,44... 0,60).

Предпринятое нами рассмотрение влияния погодных условий и показателей состояния растений на урожай показало [175, 179], что методика прогноза средней областной урожайности ярового ячменя в Нечерноземной зоне должна учитывать среднюю температуру воздуха и средние запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы за периоды всходы—выход в трубку и выход в трубку—колошение, а также высоту растений в фазу колошения.

При прогнозировании урожайности в годы с ранней весной целесообразно дополнительно учитывать среднюю температуру в период массового сева ранних яровых зерновых культур, а при оценке возможной урожайности в годы с поздней весной следует также принять во внимание продолжительность периода массового сева и сроки его завершения [186].

Для получения прогностических уравнений был применен метод разложения по естественным ортогональным составляющим [235].

Полученные уравнения имеют вид [186]:

а) основное уравнение

$$\begin{aligned} Y/Y_{\max} = & -0,0042t_2 - 0,0077t_3 + 0,0008W_1 + \\ & + 0,0031W_2 + 0,0015h + 0,5878; \end{aligned} \quad (8.19)$$

$$R = 0,788, \quad n = 81;$$

б) для лет с ранней весной

$$\begin{aligned} Y/Y_{\max} = & -0,0030t_1 - 0,0052t_2 - 0,0070t_3 + 0,0010W_1 + 0,0010W_2 + \\ & + 0,0003h + 0,7088; \end{aligned} \quad (8.20)$$

$$R = 0,804, \quad n = 38;$$

в) для лет с поздней весной

$$\begin{aligned} Y/Y_{\max} = & -0,0080t_2 - 0,0072t_3 + 0,0010W_1 + 0,0012W_2 + 0,0014h - \\ & - 0,0009d - 0,0040l + 0,8023; \end{aligned} \quad (8.21)$$

$$R = 0,831, \quad n = 42,$$

где Y/Y_{\max} — отношение прогнозируемой величины урожая к максимально возможной урожайности, безразмерное; t_1 — средняя температура воздуха за период массового сева ранних яровых зерновых культур, °С; t_2 — средняя температура воздуха за период всходы—выход в трубку, °С; t_3 — средняя температура воздуха за период выход в трубку—колошение, °С; W_1 — средние запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см за период всходы—выход в трубку, мм; W_2 — средние запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см и за период выход в трубку—колошение, мм; l — продолжительность периода массового сева (20—80 % фактической площади посева), сутки; d — дата завершения массового сева, условно выраженная в днях, начиная от 1 мая;

h — средняя по области высота растений в фазе колошения, см; R — множественный коэффициент корреляции; n — объем выборки.

Применительно к культуре овса в прогностическую схему необходимо ввести следующие показатели: средние температуры воздуха за периоды посев—выход в трубку и выход в трубку—выметывание; запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы за период посев—выход в трубку; запасы продуктивной влаги в полуметровом слое почвы за период выход в трубку—выметывание и на фазу выметывания; высоту растений на фазу выметывания [177, 178].

Для получения прогностического уравнения был применен компонентный анализ. При построении оптимального уравнения мы ограничились учетом двух коэффициентов разложения.

Полученное уравнение имеет вид [178]:

$$Y/Y_{\max} = -0,0011t_1 - 0,0125t_2 + 0,0021W_1 + 0,0012W_2 + 0,0010W_3 + \\ + 0,0018h + 0,5358, \quad (8.22) \\ R = 0,738, \quad n = 94,$$

где Y/Y_{\max} — отношение прогнозируемой величины урожая к максимально возможной урожайности, безразмерное; t_1 — средняя температура воздуха за период посев—выход в трубку, °C; t_2 — средняя температура воздуха за период выход в трубку—выметывание, °C; W_1 — средние запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см за период посев—выход в трубку, мм; W_2 — средние запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—50 см за период выход в трубку—выметывание, мм; W_3 — средние запасы продуктивной влаги в 0—50 см слое почвы на фазу выметывания, мм; h — средняя по области высота растений в фазе выметывания, см.

Естественно, что ценность предложенных методов прогнозирования урожайности ранних яровых зерновых культур определяется точностью составленных по этим методам прогнозов.

Оправдываемость прогнозов урожайности, составляемых гидрометбюро и бюро погоды по предложенным нами методам, составляет в среднем по УГКС: Северному — ячмень — 90 %, овес — 83 %; Верхне-Волжскому — ячмень — 74 %, овес — 77 %; Северо-Западному — ячмень — 76 %.

8.3. Динамико-статистические методы прогноза урожайности применительно к конкретным почвенно-климатическим зонам

Проведение исследований по выбору наиболее приемлемого подхода к экстраполяции тенденции урожайности (см. п. 8.1), разработка методов определения параметров динамических моделей формирования урожая на основе стандартной агрометеорологической информации (см. гл. 4) создали предпосылки для перехода

к качественно новому этапу в развитии динамико-статистического прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур. Коротко его можно сформулировать как создание на основе динамико-статистических методов прогнозирования урожая методик прогноза применительно к различным регионам страны [204, 205].

Наряду с теоретическими представлениями о процессе формирования урожая конкретной культуры в динамических моделях продуктивности содержатся количественные характеристики — параметры моделей. Среди параметров динамических моделей формирования урожая выделяются две группы.

Первую составляют характеристики, которые присущи данному виду культуры, а их численные значения могут быть приняты независимыми от условий местообитания. Числовые значения этих параметров определяются на стадии разработки динамической модели и метода прогноза урожая конкретной сельскохозяйственной культуры.

Во вторую группу входят свойственные культуре характеристики, численные значения которых изменяются в зависимости от климатических условий возделывания культуры.

К определению числовых значений параметров второй группы, оценке их географической изменчивости на основе стандартной агрометеорологической информации и сводится проблема разработки методик прогноза урожая сельскохозяйственных культур применительно к конкретной почвенно-климатической зоне или отдельной ее части.

Таким образом, методики прогноза урожая какой-либо культуры применительно к конкретной территории разрабатываются на основе динамико-статистического метода прогнозирования урожая этой культуры, составной частью которого является динамическая модель продуктивности культуры [204, 205].

Разработка таких методик сводится к определению применительно к условиям конкретной территории численных значений тех параметров моделей, которые изменяются в зависимости от климатических условий возделывания культуры. Для этой цели рассматриваются предложенные нами в гл. 7 варианты моделей, в которых в качестве входной используется декадная оперативная агрометеорологическая информация.

Как уже ранее указывалось, параметры моделей формирования урожая можно разделить на две группы.

Первую группу параметров составляют:

- параметры световой кривой фотосинтеза Φ_{\max} и a_{Φ} ;
- функции влияния температуры воздуха ψ_{Φ} и влажности почвы γ_{Φ} на интенсивность фотосинтеза;
- коэффициенты затрат на поддержание структур c_g и коэффициенты затрат на конструктивное дыхание c_m .

Численные значения этих параметров приняты независимыми от условий местообитания.

Вторая группа объединяет следующие параметры:

- онтогенетические кривые фотосинтеза α_{Φ} ;

- онтогенетические кривые дыхания α_R ;
- функции периода вегетативного роста β_i ;
- функции периода репродуктивного роста ψ_i .

Расчет этих функций осуществляется применительно к конкретной территории на основе стандартной агрометеорологической информации, опубликованной в справочниках «Агроклиматические ресурсы области». Для этой цели определяются [204, 205] суммы температур воздуха (эффективных выше 5°C для озимых и ранних яровых зерновых культур, активных выше 7°C для картофеля) за основные периоды вегетации:

- возобновление вегетации (всходы)—выход в трубку, $\sum T_3$;
- возобновление вегетации (всходы)—колошение (выметывание, бутонизация), $\sum T_4$;
- возобновление вегетации (всходы)—цветение, $\sum T_5$;
- возобновление вегетации (всходы)—восковая спелость (увядание ботвы), $\sum T_6$.

Для определения параметров онтогенетической кривой фотосинтеза α_F и дыхания α_R в соответствии с выражением (3.3) задаются суммы температур $\sum T_{1(2)}$, характеризующие период, когда наступает максимальная интенсивность фотосинтеза или дыхания. Эти суммы равны $1/4 \sum T_6$.

Численные значения функций периода вегетативного β_i и репродуктивного ψ_i роста, описывающих перераспределение между органами растений «свежих» и «старых» ассимилятов, определяется суммами температур, необходимыми для завершения роста листьев, стеблей, корней, начала роста колоса, клубней, наступления восковой спелости или увядания ботвы [204, 205].

Время появления и завершения роста каждого органа отнесено к соответствующей фазе развития растений. Тогда сумма температур, определяющая положение ростовой функции какого-либо органа, т. е. сумма $\sum T_{\text{req } i}$ в выражениях (4.25) и (4.32) будет равна:

для листьев

$$\sum T_{\text{req l}} = 1/2 \sum T_4,$$

для стеблей

$$\sum T_{\text{req s}} = 1/2 \sum T_5,$$

для корней

$$\sum T_{\text{req r}} = 1/2 T_5.$$

Время появления стеблей

$$\sum T_s = \sum T_3.$$

Необходимо определить сумму температур $\sum T_p$, с которой начинается рост репродуктивного органа.

Для зерновых культур эта сумма определяется по формуле

$$\sum T_p = \frac{\sum T_3 + \sum T_4}{2}. \quad (8.23)$$

Для картофеля

$$\sum T_p = \sum T_4.$$

Положение ростовой функции колоса (клубней) определяется суммой температур $\sum T_{\text{req. p}}$, которая находится по следующему выражению:

$$\sum T_{\text{req. p}} = \frac{\sum T_6 - \sum T_p}{2} + \sum T_p. \quad (8.24)$$

Таким образом, определение числовых значений параметров моделей основывается на использовании сумм температур воздуха за основные периоды вегетации культурных растений.

Для разработки методики прогноза необходима соответствующая обработка данных агрометеорологических наблюдений с целью получения этих кардинальных сумм. Суммы температур за основные периоды вегетации отражают климатические условия возделывания культуры на конкретной территории. Они свойственны только этой территории и, следовательно, параметры методики прогноза будут отражать особенности этой конкретной территории.

Для проверки предложенного подхода определения параметров моделей были использованы данные тематических наблюдений (применительно к среднеспелым сортам картофеля) агрометеорологических станций, расположенных в различных почвенно-климатических зонах страны.

Рассчитаем в соответствии с изложенным выше по областным агроклиматическим справочникам суммы температур, необходимые для определения параметров α_F , α_R , β_i и ν_i .

О географической изменчивости сумм температур можно судить по приведенным в табл. 8.6 данным. Как видно из табл. 8.6, с запада на восток наблюдается некоторое изменение сумм температур, необходимых для прохождения отдельных фаз развития, завершения роста отдельных органов, а также сумм температур за всю вегетацию. Полученные суммы температур соответствуют климатическому режиму рассматриваемых районов. В табл. 8.6 приведены данные для шести пунктов, для которых имеется достаточно полная агрометеорологическая информация, позволяющая осуществить расчеты по модели.

Таблица 8.6. Изменение сумм активных (выше 7 °С) температур (°С) с северо-запада на юго-восток для разных фаз развития картофеля

Фаза развития	Добеле	Минск	Вологда	Ройка	Омск	Хакасская
Всходы—бутонизация	500	450	350	350	500	450
Бутонизация—цветение	200	200	200	350	200	250
Цветение—увядание ботвы	800	800	550	700	700	800

В качестве начальных значений примем данные о биомассе отдельных органов и площади ассимилирующей поверхности «среднего» растения.

Проведенные расчеты показывают (рис. 8.1), что ход рассчитанных значений сухой биомассы клубней картофеля достаточно удовлетворительно согласуется с ходом биологического урожая сырой массы клубней картофеля.

Ясно, однако, что абсолютные значения рассчитанной сырой массы урожая не всегда соответствуют фактическим данным. Они выше наблюдаемого биологического урожая сырой биомассы клубней. Причина такого расхождения заключается как, в частности,

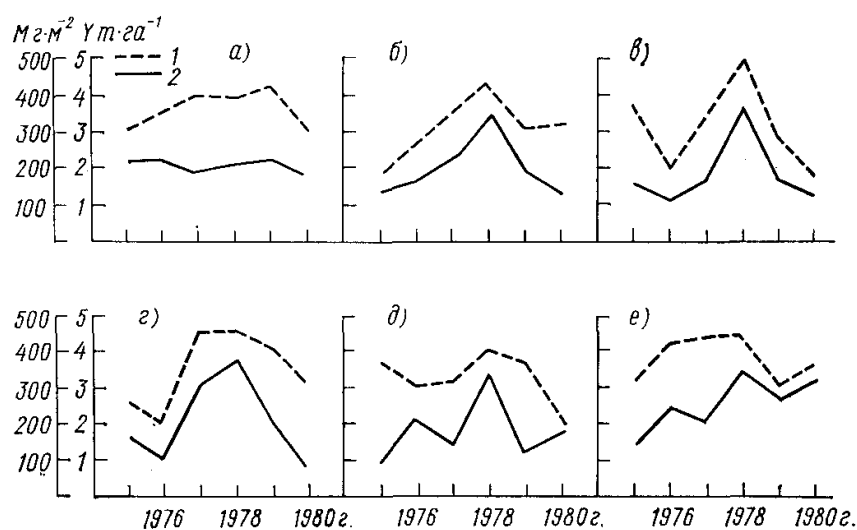


Рис. 8.1. Изменение рассчитанной сухой биомассы M клубней (1) и фактического урожая картофеля (2) за период 1975—1980 гг. для ряда станций.

Станции: а — Добеле, б — Минск, в — Вологда, г — Ройка, д — Омск, е — Хакасская.

в известном огрублении расчетов при переходе от сухой биомассы клубней к сырой, так, и это является главным, и в различии уровней агротехники в столь отличающихся по условиям почвенно-климатических зонах.

Однако для нас, как уже ранее отмечалось, более важным обстоятельством является не совпадение абсолютных значений урожайности, а совпадение по знаку от года к году колебаний фактической урожайности и урожайности, рассчитанной по модели, в процессе расчета которой использовалась агрометеорологическая информация, характеризующая агрометеорологические условия этих же рассматриваемых лет.

Последнее обстоятельство позволяет использовать модели в качестве основы методики прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур.

Таким образом, на стадии разработки метода прогнозирования урожая конкретной сельскохозяйственной культуры определяются численные значения первой группы параметров моделей продукционного процесса (см. гл. 4 и 5). Это характеристики, которые

генетически присущи данной культуре, их численные значения могут быть приняты независимыми от условий местообитания.

Вторая группа параметров состоит из характеристик, численные значения которых меняются в зависимости от климатических условий возделывания культуры. Оценка географической изменчивости этих характеристик на основе стандартной агрометеорологической информации, описанная в п. 5.3 и в данном разделе, дает возможность вести на основе уже созданных методов прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур (см. п. 8.1) разработку методик прогнозирования применительно к конкретным почвенно-климатическим зонам.

Так, на основе разработанных методов оценки агрометеорологических условий произрастания и прогнозирования урожайности таких культур, как озимая пшеница, озимая рожь и картофель [194, 196, 198, 199], после оценки параметров моделей, характеризующих климатические условия возделывания культуры, были разработаны методики прогнозирования урожая этих культур применительно к условиям Прибалтики и Белоруссии [193, 195, 203].

В подготовленном нами методическом пособии по разработке динамико-статистических методов прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур [205] изложены приемы обработки стандартной агрометеорологической информации, описания алгоритмов, программ и примеров, необходимые для развития этих методов в системе Госкомгидромета.

Предложенный способ разработки методик прогнозирования урожая сельскохозяйственных культур применительно к конкретным почвенно-климатическим зонам на базе уже созданных динамико-статистических методов прогнозирования является важным по следующим причинам: во-первых, с точки зрения использования положений количественной теории формирования урожая посевов сельскохозяйственных культур в качестве основы методов агрометеорологических прогнозов и расчетов; во-вторых, развития на этой основе динамико-статистических методов прогнозирования урожая сельскохозяйственных культур в различных районах страны. В этом принципиальная особенность выполненного исследования.

Предложенный комплекс методов оценки агрометеорологических условий произрастания сельскохозяйственных культур, прогнозирования продуктивности этих культур внедряется в практику агрометеорологического обеспечения, которое ведется подразделениями Госкомгидромета:

— статистические методы прогнозирования средней областной урожайности ярового ячменя, овса, метод оценки условий уборки урожая картофеля прошли производственные испытания, утверждены Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим прогнозам Госкомгидромета и внедрены в практику оперативного обеспечения сельского хозяйства Северного, Северо-Западного и Верхне-Волжского УГКС. Помимо УГКС нечерноземной зоны РСФСР метод оценки условий уборки урожая внедрен

в УГКС Эстонской, Латвийской, Литовской и Белорусской ССР, а также в Уральском УГКС;

— динамико-статистические методы оценки условий формирования урожая озимых культур и прогнозирования урожая картофеля прошли производственные испытания и решениями Технических советов УГКС (Северного, Северо-Западного, Верхне-Волжского и Уральского) и рекомендованы к практическому использованию. Методы прогнозирования урожая озимых культур на осушаемых землях проходят производственные испытания в УГКС Эстонской, Латвийской, Литовской и Белорусской ССР;

— комплекс методов прогнозирования урожайности озимых (пшеница, рожь) и ранних яровых (пшеница, ячмень, овес) зерновых культур на территории Европейской части СССР в опытном порядке внедряется в Гидрометцентре СССР;

— метод определения биологического урожая зерновых колосовых культур, разработанный совместно с Куликом и Пономаревым, прошел производственные испытания, утвержден Центральной методической комиссией по приборам и методам наблюдений Госкомгидромета и внедрен в 28 УГКС сельскохозяйственной зоны страны.

Методы оценок и прогнозирования урожайности включены составной частью в комплексную имитационную модель растениеводства, разработка которой велась ВНИИСХМ. Выполненная разработка принята заказчиком и внедряется в практику.

Различные варианты динамических моделей продукционного процесса внедрены также в ряде других организаций: КазНИИ, ЗакНИИ, ЛАМ и ВИР.

Для развития динамико-статистических методов прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в системе Госкомгидромета подготовлено методическое пособие [205] по их разработке на основе стандартной агрометеорологической информации.

В перспективе единая методология и единая информационная база позволит внедрение динамико-статистических методов прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур вести поэтапно, аналогично тому, как это осуществляется в Гидрометцентре СССР: с одной стороны, пополняя комплекс методов прогнозирования новыми методами применительно к новым группам культур, с другой, — расширяя перечень регионов, для территории которых будут составляться прогнозы продуктивности сельскохозяйственных культур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе количественной теории формирования урожая посевов сельскохозяйственных культур процесс формирования урожая рассмотрен как сложная совокупность целого ряда физиологических

процессов, интенсивность и направленность которых определяются не только факторами внешней среды и биологическими особенностями растений, но и взаимосвязью самих процессов. Моделирование влияния агрометеорологических условий на фотосинтетическую продуктивность посевов и исследование закономерностей временных рядов урожаев сельскохозяйственных культур позволили развить положения теории агрометеорологических прогнозов — создать новое динамико-статистическое направление в агрометеорологических прогнозах, основанное на синтезе статистического и динамического подходов в прогнозировании урожаев сельскохозяйственных культур.

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Исследовано влияние агрометеорологических условий на фотосинтетическую продуктивность посевов сельскохозяйственных культур, количественно описано влияние факторов внешней среды на основные физиолого-биохимические процессы — составляющие продукционного процесса растений, дано объяснение некоторых особенностей воздействия внешних факторов на продуктивность растений, исследованы адаптивные реакции растений на изменения условий внешней среды.

2. Осуществлено моделирование воздействия экстремальных погодных условий (заморозки, засуха) и повреждений болезнями на основные процессы жизнедеятельности растений; в динамические модели формирования урожая зерновых культур введен блок накопления биомассы зерна; разработан новый подход к оценке количества функционирующей биомассы и описанию динамики ассимилирующей поверхности.

3. Предложены длиннопериодные динамические модели продукционного процесса, ориентированные на использование:

— для теоретических исследований отдельных составляющих продукционного процесса и формирования урожая в целом во взаимосвязи с агрометеорологическими условиями;

— для разработки методов агрометеорологических прогнозов.

4. На основе рассмотрения частного случая закона роста и моделирования наиболее общего процесса, характеризующего старение живых организмов — распад жизнедеятельных структур, предложены полуэмпирические методы определения ростовых функций периода вегетативного и репродуктивного роста. Определение ростовых функций — важнейшего звена моделей формирования урожая — осуществляется на основе стандартной агрометеорологической информации.

5. Исследована чувствительность предложенных моделей к изменению параметров и структуры моделей, а также входной информации. Исследована географическая изменчивость параметров моделей.

6. Создан комплекс динамико-статистических методов оценки агрометеорологических условий произрастания и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в Нечерноземье.

7. Предложен способ разработки на основе динамико-статистических методов прогнозирования урожая методик прогнозирования применительно к конкретным почвенно-климатическим зонам.

Выполненные исследования были вызваны запросами сельскохозяйственного производства в агрометеорологическом обеспечении и направлены на непосредственное практическое применение. Предложенные динамические модели формирования урожая могут быть также применены для теоретической оценки сортовых отличий продуктивности сельскохозяйственных культур в различных почвенно-климатических зонах, агроклиматических ресурсов этих зон, использованы в более общих моделях растениеводства.

Результаты исследований представляют собой теоретическое обобщение и решение важной проблемы в области агрометеорологии — изучение влияния агрометеорологических условий на фотосинтетическую продуктивность посевов, создание комплекса методов оценки агрометеорологических условий произрастания сельскохозяйственных культур и прогнозирование урожайности этих культур. Предложенные методы уже внедрены или внедряются в практику агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства. Развитие этих исследований и разработка на этой основе новых методов прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур будут проводиться в рамках важнейших целевых программ.

Воздействие агрометеорологических условий на основные процессы жизнедеятельности растений, адаптивные реакции растений на эти воздействия чрезвычайно сложны. Количественное описание реакции растений на влияние агрометеорологических условий идет естественным путем — от построения сравнительно простых моделей отдельных составляющих продукционного процесса до детального описания важнейших процессов, происходящих в системе растение — среда, создания длиннопериодных динамических моделей продукционного процесса.

Как видно из материалов, изложенных в работе, решение проблемы идентификации параметров моделей на основе стандартной агрометеорологической информации, делает возможным их применение при создании методов оценки агрометеорологических условий произрастания сельскохозяйственных культур, прогнозирования их продуктивности. Исследование географической изменчивости структурно-функциональных характеристик моделей позволяет наметить перспективы развития исследований в области агрометеорологических прогнозов.

Использование модели формирования урожая зерновых культур в качестве базовой дает возможность создавать аналогичные модели продукционного процесса применительно к другим сельскохозяйственным культурам, как это уже сейчас имеет место для таких культур, как озимая рожь [196], яровая пшеница [88, 204], многолетние травы [133]. Оценка географической изменчивости параметров моделей позволяет на основе уже созданных динамико-статистических методов прогнозирования урожайности сельскохо-

зяйственных культур вести разработку методик прогнозирования применительно к различным почвенно-климатическим зонам страны. Первая реализация такого подхода осуществлена в работах [193, 195, 203] применительно к условиям Прибалтики и Белоруссии.

Логическим продолжением этих исследований является создание моделей, включающих описание процессов формирования качества урожая сельскохозяйственных культур, развитие на этой основе новых методов прогнозирования количества и качества урожая, агрометеорологических принципов программирования урожая.

В настоящем виде результаты проведенных исследований служат основой для совершенствования агрометеорологического обеспечения сельскохозяйственного производства, что необходимо в связи с решением задач по развитию сельского хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О мерах по дальнейшему развитию сельского хозяйства Нечерноземной зоны РСФСР. Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР.— М.: Политиздат, 1975.— 23 с.
2. Брежнев Л. И. Отчетный доклад Центрального Комитета КПСС XXVI съезду Коммунистической партии Советского Союза и очередные задачи партии в области внутренней и внешней политики.— М.: Политиздат, 1961.— 96 с.
3. Продовольственная программа СССР на период до 1990 г. и меры по ее реализации. Материалы майского Пленума ЦК КПСС 1982 г.— Партийная жизнь, 1982, № 12.
4. Абашина Е. В., Просвиркина А. Г., Сиротенко О. Д. Упрощенная динамическая модель формирования урожая ярового ячменя.— Труды ИЭМ, 1977, вып. 8(67), с. 54—67.
5. Абашина Е. В. Метод учета азотного питания растений в динамических моделях, предназначенных для оценки агрометеорологических условий формирования урожая яровых зерновых культур.— Труды ИЭМ, 1979, вып. 13(91), с. 101—119.
6. Абдуллаев Х. М., Муминов Ф. А. К методике прогноза урожая риса в Узбекистане.— Труды САРНИГМИ, 1978, вып. 56(137), с. 34—44.
7. Аксарина Е. А., Пасов В. М. Прогноз урожайности яровой пшеницы до сева в Казахстане на основе использования особенностей развития циркуляции атмосферы.— Экспресс-информация ВНИИГМИ—МЦД, 1978, вып. 1(51), с. 12—20.
8. Алпатов А. М. Влагодоборы в природе и их преобразования.— Л., Гидрометеиздат, 1969.— 323 с.
9. Ан П. А., Ефимова В. П., Никитина Л. М. К прогнозу урожая растительной массы пастбищных трав в горах Киргизии.— Труды САРНИГМИ, 1974, вып. 19 (100), с. 48—56.
10. Андреева Т. Ф. Физиология фотосинтеза.— В кн.: Физиология сельскохозяйственных растений.— М.: изд. МГУ, 1967, т. 1, с. 267—309.
11. Арисланов Р. С., Завенутдинов З. Х. Агрометеорологические факторы и их влияние на формирование урожая озимой пшеницы в республиках Средней Азии.— Труды САРНИГМИ, 1978, вып. 56 (137), с. 50—59.
12. Банкин М. П. Непрерывное определение газообмена картофельного растения в естественных условиях.— Вестник ЛГУ, 1971, № 3.
13. Бедарев С. А., Коробова Е. Н., Лебедь Л. В., Гамаюнова М. С., Яковлева Г. П. Возможности агрометеорологического прогнозирования урожая естественной растительности природного комплекса.— Труды КазНИГМИ, 1978, вып. 69, с. 132—143.
14. Берлянд Т. Г. Распределение солнечной радиации на континентах.— Л.: Гидрометеиздат, 1961.— 280 с.
15. Бихеле З. Н., Молдау Х. А., Росс Ю. К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги.— Л.: Гидрометеиздат, 1980.— 223 с.
16. Бихеле И. Г., Молдау Х. А., Росс Ю. К. Субмодель распределения ассимилятов и роста растения при водном дефиците.— Препринт А-5, Тарту, 1980.— 23 с.

17. Бондаренко С. Г., Кибенко Т. Я., Буянович Н. А. Программирование урожаев винограда.— Кишинев: Штиинца, 1977.—102 с.
18. Броунов П. И. Сельскохозяйственная метеорология.— Избр. соч., ч. 2.— Л.: Гидрометеониздат, 1957.—339 с.
19. Брыскина Л. Ю., Вол И. А., Разоренова Т. А. Динамика архитектоники надземной части посева пшеницы в процессе онтогенеза.— В кн.: Теоретические основы и количественные методы программирования урожаев.— Л., изд. АФИ, 1979, с. 125—134.
20. Будаговский А. И., Ничипорович А. А., Росс Ю. К. Количественная теория фотосинтеза и ее использование для решения научных и практических задач физической географии.— Изв. АН СССР. Серия геогр., 1964, № 6, с. 13—27.
21. Будаговский А. И., Росс Ю. К. Основы количественной теории фотосинтетической деятельности посевов.— В кн.: Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности.— М.: Наука, 1966, с. 51—58.
22. Будаговский А. И., Росс Ю. К. Основные черты количественной теории фотосинтетической деятельности растительного покрова.— В кн.: Общие теоретические проблемы биологической продуктивности.— Л.: Наука, 1969, с. 148—155.
23. Будин А. Уравнение роста растения.— Вестник сельскохозяйственной науки, 1975, № 1, с. 124—128.
24. Будыкина Н. П., Комулайнен А. А., Кучко А. А., Холодцева Н. П. Сравнительная морозоустойчивость полевых культур.— В кн.: Устойчивость растений к низким положительным температурам и заморозкам и пути ее повышения.— М.: Наука, 1969, с. 105—109.
25. Будыкина Н. П., Коровин А. И., Дроздов С. Н., Балагурова Н. И. Влияние заморозков на урожай картофеля.— Труды ИЭМ, 1975, вып. 4(48), с. 107—112.
26. Будыкина Н. П., Дроздов С. Н. Влияние заморозков на продуктивность полевых культур.— В кн.: Эколого-физиологические аспекты устойчивости растений к заморозкам.— Л.: Наука, 1977, с. 57—85.
27. Будыкина Н. П., Дроздов С. Н. Устойчивость растений к заморозкам.— В кн.: Эколого-физиологические аспекты устойчивости растений к заморозкам.— Л.: Наука, 1977, с. 36—56.
28. Будыко М. И. К теории влияния климатических факторов на фотосинтез.— ДАН СССР, 1964, т. 158, № 2, с. 331—334.
29. Будыко М. И. и др. К теории фотосинтеза в слое растительного покрова.— ДАН СССР, 1965, т. 164, № 2, с. 454—457.
30. Будыко М. И. Климат и жизнь.— Л., Гидрометеониздат, 1971.—472 с.
31. Будыко М. И. и др. Влияние метеорологических факторов на фотосинтез.— В кн.: Теоретические основы фотосинтетической продуктивности. М., Наука, 1972, с. 424—436.
32. Вальтер Р., Лампрехт И. Современные теории и уравнения роста.— В кн.: Термодинамика биологических процессов.— М.: Наука, 1976, с. 98—112.
33. Венцкевич Г. З. Об использовании для оперативных целей метода балловой оценки суточного комплекса условий погоды и увлажнения почвы в отношении формирования урожая яровой пшеницы.— Труды ЦИП, 1959, вып. 88, с. 28—37.
34. Вериго С. А. Методика составления прогноза запасов продуктивной влаги в почве и оценка влагообеспеченности зерновых культур.— В кн.: Сборник методических указаний по анализу и оценке сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий.— Л.: Гидрометеониздат, 1957, с. 143—165.
35. Вериго С. А., Разумова Л. А. Почвенная влага (применительно к запросам сельского хозяйства).— Л.: Гидрометеониздат, 1973.—328 с.
36. Веселовский К. С. О климате России.— Изд. АН, СПб, 1857.
37. Воейков А. И. Сельскохозяйственная метеорология.— Избр. соч. Л., Гидрометеониздат, 1957.—256 с.
38. Вольвач В. В., Федченко П. П. Опыт определения фитопатологического состояния посевов картофеля по коэффициентам спектральной яркости.— Метеорология и гидрология, 1976, № 3, с. 89—94.

39. Галямин Е. П. О построении динамической модели формирования урожая агроценозов.— В кн.: Биологические системы в земледелии и лесоводстве.— М.: Наука, 1974, с. 70—84.
40. Галямин Е. П., Сиптиц С. О. Об использовании методов математического моделирования для расчета продуктивности сельскохозяйственных культур при различных режимах орошения.— В кн.: Биологические основы орошаемого земледелия.— М.: Наука, 1974, с. 145—149.
41. Галямин Е. П., Сиптиц С. О., Милютин Н. Н. Модель формирования урожая агробиоценоза и ее идентификация.— В кн.: Моделирование продукционных процессов в агроэкосистемах.— М.: Наука, 1976, с. 36—63.
42. Галямин Е. П., Милютин Н. Н., Сиптиц С. О. Математическое моделирование процессов формирования урожая.— В кн.: Вопросы управления комплексом факторов жизни растений. 1978, с. 51—65.
43. Герасимов С. А. О некоторых направлениях усовершенствования картофелеуборочных комбайнов.— В кн.: Исследования по механизации уборки картофеля.— М.; изд. МСХ СССР, 1958, с. 7—20.
44. Гильманов Т. Г. Математическое моделирование биогеохимических циклов в травяных экосистемах.— М.: изд. МГУ, 1978.— 167 с.
45. Гойса Н. И., Перелет Н. А., Митрофанов Б. А. и др. Модель фотосинтетической продуктивности озимой пшеницы.— Труды УкрНИГМИ, 1979, вып. 173, с. 113—122.
46. Гольцберг И. А. Агроклиматическая характеристика заморозков в СССР и методы борьбы с ними.— Л.: Гидрометеиздат, 1961.— 198 с.
47. Горячкин В. П. Собрание сочинений. Т. 1.— М.: Колос, 1965.— 720 с.
48. Грингоф И. Г. Пастбищные растения Кызылкума и погода.— Труды САРНИГМИ, 1967, вып. 34(49).— 138 с.
49. Грингоф И. Г., Сабинина И. Г. Методика агрометеорологического прогноза выгорания весенних трав в пустынях Средней Азии.— Труды САРНИГМИ, 1976, вып. 28(109), с. 80—87.
50. Грушка Г. И. Метод долгосрочного прогноза среднеобластной урожайности озимого ячменя на Украине.— Труды УкрНИГМИ, 1968, вып. 72, с. 55—63.
51. Гулинова Н. В. Методическое пособие по составлению долгосрочных агрометеорологических прогнозов областной урожайности сена на Азиатской территории СССР.— М.: Гидрометеиздат, 1974.— 15 с.
52. Гуляев Б. И. Динамика площади листьев и вопросы моделирования продукционного процесса.— Физиология и биохимия культурных растений, 1980, т. 12, № 3, с. 238—251.
53. Давид Р. Э. Сельскохозяйственная метеорология.— М.: Сельхозгиз, 1936.— 226 с.
54. Давитая Ф. Ф. Прогноз обеспеченности теплом и некоторые проблемы сезонного развития природы.— М.: Гидрометеиздат, 1964.— 131 с.
55. Дегтярева Г. В. Прогноз урожая яровой пшеницы до ее посева по инерционным факторам.— Метеорология и гидрология, 1973, № 4, с. 77—84.
56. Джафарова Ф. С., Рзаев Г. А. Влияние условий влажности почвы на динамику интенсивности фотосинтеза у озимой пшеницы.— Уч. зап. Азербайджанского гос. ун-та. Серия биология. 1971.
57. Джеймс В. Дыхание растений.— М.: изд-во иностр. лит., 1956.— 439 с.
58. Дмитренко В. П., Бенедичук А. Э. Методика и опыт составления прогноза урожайности ярового ячменя на примере районов Днепропетровской области.— Труды УкрНИГМИ, 1976, вып. 151, с. 77—85.
59. Дмитренко В. П. Метод агрометеорологического расчета и прогноза урожайности кукурузы на Украине.— Труды УкрНИГМИ, 1977, вып. 159, с. 3—13.
60. Дмитренко В. П., Короткова А. Я. Метод расчета урожайности озимой ржи и его проверка.— Труды УкрНИГМИ, 1977, вып. 159, с. 14—28.
61. Дмитренко В. П. Современные направления исследований и методологические аспекты проблемы урожайности (модели типа погода—урожай).— Труды УкрНИГМИ, 1978, вып. 164, с. 33—48.
62. Дмитренко В. П. Методические указания по составлению прогноза урожайности озимой пшеницы на территории УССР.— Киев, 1978.— 36 с.
63. Дорохов А. П. Исследование технологических особенностей разрушения

- почвенных комков в целях более полного выделения клубней картофеля рабочими органами картофелеуборочных машин.— Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук.— Челябинск, 1968.— 22 с.
64. Дроздов С. Н., Новиккая Ю. Е., Комулайнен А. А. и др. Влияние заморозков на урожай и некоторые физиологические и экологические процессы у яровой пшеницы.— В кн.: Вопросы физиологии и экологии растений в условиях Севера.— Петрозаводск, 1960, с. 979—981.
 65. Дроздов С. Н., Сычева З. Ф. Зависимость устойчивости ботвы картофеля к заморозкам от уровня азотного обмена.— Физиология растений, 1965, т. 12, в. 2, с. 325—331.
 66. Дроздов С. Н. Эколого-физиологическое исследование устойчивости полевых культур к заморозкам.— Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. д-ра наук.— Л., 1971.
 67. Желиговский В. А. Применение принципа академика В. П. Горячкина к изучению природных явлений.— Докл. ТСХА, 1946, вып. 4, с. 27—30.
 68. Желтая Н. Н. О связи областной урожайности ярового ячменя с основными метеорологическими элементами в различных зонах ЕТС СССР.— Труды Гидрометцентра СССР, 1973, вып. 111, с. 21—30.
 69. Желтая Н. Н. О связях средней областной урожайности овса с основными метеорологическими элементами в различных зонах Европейской территории СССР.— Труды Гидрометцентра СССР, 1974, вып. 130, с. 104—113.
 70. Заброда О. К., Абашина Е. В. Идентификация параметров модели погода—урожай для расчетов урожая картофеля. Труды ИЭМ, 1979, вып. 12(90), с. 89—96.
 71. Жуков В. А. Исследование статистической структуры полей влагозапасов в почве.— Труды ИЭМ, 1970, вып. 18, с. 27—34.
 72. Закржевский П. И. Модель урожая на основе фотосинтеза. Доклады ВАСХНИЛ, 1976, 6, с. 14—16.
 73. Зойдзе Е. К. Связь урожая клубней картофеля с метеорологическими факторами вегетационного периода в зависимости от доз удобрений. Труды ИЭМ, 1971, вып. 22, с. 137—144.
 74. Зотина Р. С., Зотин А. И. Дифференциальные уравнения биологии развития.— В кн.: Термодинамика биологических процессов.— М.: Наука, 1976, с. 83—92.
 75. Зубарев Н. А. Методика оценки агрометеорологических условий формирования урожая сельскохозяйственных культур (путем оценки аномалий).— Труды ЦИП, 1959, вып. 8, с. 37—57.
 76. Иванов Л. А. Свет и влага в жизни наших древесных пород. М.: изд. АН СССР, 1946.— 60 с.
 77. Иванова-Зубкова Н. З. Методические указания по составлению прогноза средней областной урожайности гречихи.— М.: Гидрометеоиздат, 1973.— 12 с.
 78. Иванова-Зубкова Н. З. Агрометеорологические условия произрастания зернобобовых культур на Украине.— Труды ГМЦ, 1978, вып. 193, с. 84—89.
 79. Иванченко В. М., Легенченко Б. И., Гончарик М. П. Водный дефицит ассимиляционной ткани и интенсивность фотосинтеза в связи с условиями водообеспеченности растений.— В кн.: Фотосинтез и устойчивость растений.— Минск, 1973.
 80. Кабыш В. А. Формирование листового аппарата у разных сортов ячменя в зависимости от густоты посева.— Изв. ТСХА, 1969, вып. 6, с. 27—33.
 81. Калер В. Л., Фридлянд Л. Е. Математическая модель совместной регуляции систем биосинтеза хлорофилла и фотосинтеза.— Сб. трудов АФИ, 1976, вып. 38, с. 12—22.
 82. Карманова И. В. Математические методы изучения роста и продуктивности растений.— М.: Наука, 1976.— 222 с.
 83. Каюмов М. К. Справочник по программированию урожаев.— М.: Россельхозиздат, 1977.— 187 с.
 84. Кириличева К. В. Методическое пособие по составлению прогноза средней областной урожайности яровой пшеницы.— М.: Гидрометеоиздат, 1965.— 8 с.

85. Кисиленко А. А. Расчет урожайности сахарной свеклы по метеорологическим условиям и продолжительности периода вегетации в свекольной зоне Украины.— Труды УкрНИГМИ, 1971, вып. 109, с. 22—26.
86. Кислякова Т. Е., Голубкова Б. М., Богачева И. И. Взаимосвязь структуры и функции фотосинтетического аппарата в онтогенезе картофеля.— Физиология растений, 1967, т. 14, вып. 1.
87. Клещенко А. Д. Дистанционные методы измерения агрометеорологических элементов.— В кн.: Агрометеорология — Нечерноземью.— Л.: Гидрометеиздат, 1976, с. 101—107.
88. Клещенко А. Д., Полевой А. Н. Динамическая модель формирования урожая пшеницы сорта *Siette Cerros* весенне-летнего периода вегетации.— Доклад для КСХМ ВМО. Обнинск, Препринт, 1979.— 20 с.
89. Комоцкая Л. В. Методика расчета технической длины стебля и прогноза средней областной урожайности льноволокна в основных районах возделывания.— Труды Гидрометцентра СССР, 1973, вып. 3, с. 31—37.
90. Константинов А. Р. Схема учета влияния погодных факторов на прирост растительной массы и урожай.— Труды УкрНИГМИ, 1966, вып. 58, с. 3—31.
91. Константинов А. Р. Погода, почва и урожай озимой пшеницы.— Л.: Гидрометеиздат, 1978.— 263 с.
92. Конторщиков А. С. Агрометеорологическая оценка условий формирования урожая сельскохозяйственных культур на примере яровой пшеницы.— Труды ЦИП, 1957, вып. 53, с. 82—95.
93. Конторщикова О. М. Оценка и прогноз агрометеорологических условий формирования урожая сахарной свеклы в Прибалтике и Белоруссии.— В кн.: Руководство по составлению агрометеорологических прогнозов.— Л.: Гидрометеиздат, 1962, с. 218—227.
94. Конторщикова О. М. Методическое пособие по составлению прогнозов средней областной урожайности и сахаристости свеклы в основных районах ее возделывания.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— 26 с.
95. Коровин А. И. Роль температуры в минеральном питании растений.— Л.: Гидрометеиздат, 1972.— 283 с.
96. Коровин А. И., Мамаев Е. В., Мокиевский В. М. Осенне-весенние условия погоды и урожай озимых.— Л.: Гидрометеиздат, 1977.— 160 с.
97. Коровин А. И. Оценка сортов сельскохозяйственных культур по агрометеорологическим показателям — важнейшая проблема агрометеорологии.— Труды по прикл. ботанике, генетике и селекции, 1980, т. 66, вып. 1, с. 3—8.
98. Костенко А. И. К вопросу разработки методики долгосрочного агрометеорологического прогноза урожая листьев табака в условиях Северной Киргизии.— Труды САРНИГМИ, 1978, вып. 56(137), с. 29—33.
99. Кошкин В. А. Температурные кривые потенциальной интенсивности фотосинтеза яровой пшеницы различного происхождения.— Докл. ВАСХНИЛ, 1970, 12 с.
100. Кошкин В. А. Потенциальная интенсивность фотосинтеза пшеницы при оптимальном сочетании освещенности и температуры.— Бюллетень ВИР, 1975, № 56.
101. Кравцова Б. Е. О характере налива зерна при разных размерах надземных вегетативных органов у яровой пшеницы.— Докл. ВАСХНИЛ, 1957, 6, с. 13—18.
102. Краснянская В. П. Зависимость урожая яровой пшеницы от агрометеорологических условий периода вегетации в Приморском крае.— Труды ДВНИГМИ, 1977, вып. 59, с. 3—11.
103. Кулик М. С. Оценка засушливых явлений.— В кн.: Сборник методических указаний по анализу и оценке сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий.— Л.: Гидрометеиздат, 1957, с. 57—83.
104. Кулик М. С. Основы метода агрометеорологического прогноза урожая озимых зерновых в Нечерноземной зоне.— Труды ИЭМ, 1969, вып. 8, с. 3—23.
105. Кулик М. С., Уланова Е. С. Развитие методов агрометеорологических прогнозов.— Метеорология и гидрология, 1972, № 12, с. 45—51.
106. Кулик М. С., Пономарев Б. П., Полевой А. Н. Методические

- указания по учету биологической урожайности зерновых колосовых культур.— М.: Гидрометеиздат, 1974.— 8 с.
107. Кулик М. С. Методические указания по составлению долгосрочных агрометеорологических прогнозов средней областной урожайности озимых зерновых в Нечерноземной зоне.— М.: Гидрометеиздат, 1976.— 16 с.
108. Кулик М. С., Полевой А. Н., Вольвач И. Е. Моделирование процесса формирования урожая озимой пшеницы.— Метеорология и гидрология, 1979, № 9, с. 98—106.
109. Кумаков В. А. Физиология яровой пшеницы.— М.: Колос, 1980.— 208 с.
110. Куперман И. А., Хитрово Е. В. Дыхательный газообмен как элемент продукционного процесса растений.— Новосибирск: Наука, 1977.— 181 с.
111. Куперман Ф. М., Ржапова Е. И. Биология развития растений.— М.: Высшая школа, 1963.— 423 с.
112. Купревич В. Ф. Физиология больного растения в связи с общими вопросами паразитизма.— Научные труды, т. 3, Минск; Наука и техника, 1973.— 456 с.
113. Лайск А. Х. Кинетика фотосинтеза и фотодыхание C_3 -растений.— М.: Наука, 1977.— 195 с.
114. Лархер В. Экология растений.— М.: Мир, 1978.— 185 с.
115. Леопольд А. Рост и развитие растений.— М.: Мир, 1968.— 494 с.
116. Лазовая В. В. Влияние минерального питания на интенсивность фотосинтеза различных органов яровой пшеницы.— Научн. труды Ставропольского СХИ, 1973, т. 2, вып. 36.
117. Локхарт Дж. Увеличение размеров клетки (рост в фазе растяжения).— В кн.: Биохимия растений. М.: Мир, 1968, с. 505—519.
118. Лорх А. Г. Динамика накопления урожая картофеля.— М.: Сельхозгиз, 1948.— 191 с.
119. Лорх А. Г. Картофель.— М.: Московский рабочий, 1955.— 155 с.
120. Лубнин М. Г. Исследование факторов, влияющих на урожайность картофеля в центральной черноземной зоне Европейской территории СССР.— Труды Гидрометцентра СССР, 1974, вып. 130, с. 93—101.
121. Лубнин М. Г. Прогноз урожайности картофеля в основных районах его возделывания.— Труды Гидрометцентра СССР, 1977, вып. 174, с. 80—89.
122. Масловская А. Д. Метод долгосрочного агрометеорологического прогноза среднереспубликанского урожая озимой пшеницы в Казахстане.— Труды КазНИГМИ, 1974, вып. 47, с. 117—130.
123. Меладзе Г. Г. К методике долгосрочного прогноза урожая табака и тунга.— Метеорология и гидрология, 1969, № 10, с. 94—97.
124. Меладзе Г. Г. К методике прогноза урожая чая.— Труды ЗакНИГМИ, 1969, вып. 33(39), с. 145—151.
125. Мельник Ю. С. Климат и произрастание подсолнечника.— Л.: Гидрометеиздат, 1972.— 143 с.
126. Мельник Ю. С. Методическое пособие. Метод долгосрочного агрометеорологического прогноза урожайности подсолнечника на территории областей и республик.— Л.: Гидрометеиздат, 1977.— 36 с.
127. Мещерская А. В., Пасов В. М. К применению физико-статистического метода для долгосрочного прогноза урожая ярового ячменя.— Труды ГГО, 1975, вып. 329, с. 117—125.
128. Миусский П. Е. Зависимость урожая подсолнечника от осадков и увлажнения почвы в различные периоды вегетации на Украине.— Труды ЦИП, 1965, вып. 145, с. 132—138.
129. Михайлова Н. И. Методика прогноза сахаристости сахарной свеклы.— Труды УкрНИГМИ, 1977, вып. 159, с. 49—59.
130. Мищенко З. А. Суточный ход температуры воздуха и его агроклиматическое значение.— Л.: Гидрометеиздат, 1962.— 200 с.
131. Мкртчян Р. С., Арустамян Ш. А. Методические указания по долгосрочному агрометеорологическому прогнозу урожайности озимой пшеницы в Армянской ССР.— Ереван, ЗакНИГМИ, 1975.— 27 с.
132. Моисейчик В. А. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— 295 с.
133. Мокиевский В. М., Полевой А. Н. Применение динамической мо-

дели формирования продуктивности трав для расчета их урожайности.— Труды ВНИИСХМ, 1980, вып. 3, с. 27—37.

134. Мокроносов А. Т. Фотосинтез картофеля.— В кн.: Физиология сельскохозяйственных растений. М.: изд. МГУ, 1971, т. XII, с. 99—129.

135. Мокроносов А. Т. Передвижение и использование продуктов фотосинтеза во вторичных синтетических процессах.— В кн.: Физиология сельскохозяйственных растений. М.: изд. МГУ, 1971, т. 12, с. 129—156.

136. Мокроносов А. Т., Некрасова Г. Ф. Онтогенетический аспект фотосинтеза (на примере листа картофеля).— Физиология растений, 1977, т. 24, вып. 3, с. 458—466.

137. Молдау Х. А. Влияние дефицита воды на прирост растения. (Математическая модель).— Изв. АН Эст. ССР. Биология, 1974, 23, № 4, с. 348—357.

138. Молдау Х. А. Оптимальное распределение ассимилятов при дефиците воды. (Математическая модель).— Изв. АН ЭССР. Биология, 1975, т. 24, № 1, с. 3—9.

139. Муминов Ф. А., Карнаухова В. В., Абдулаев А. К. К методике прогноза среднего областного урожая хлопка-сырца в районах хлопкосеяния Средней Азии.— Труды САРНИГМИ, 1971, вып. 55(70), с. 87—103.

140. Муминов Ф. А., Карнаухова В. В., Абдулаев А. К. и др. Методика долгосрочного агрометеорологического прогнозирования среднего районного и валового урожая хлопка-сырца в Таджикистане.— Труды САРНИГМИ, 1972, вып. 4(85), с. 3—13.

141. Муминов Ф. А., Грингоф И. Г., Карнаухова В. В. Основные итоги развития агрометеорологии в Средней Азии.— Труды САРНИГМИ, 1974, вып. 19 (100), с. 3—13.

142. Мурей И. А. Затраты на дыхание в период вегетативной фазы роста томатов.— Физиология растений, 1976, т. 23, № 5, с. 964—971.

143. Муш Н. Н. О взаимодействии гетеротрофного и автотрофного питания в онтогенезе зеленого растения.— Труды Харьковского СХИ, 1959, т. 19, с. 77—98.

144. Мяги Х., Росс Ю. Фотометрические характеристики и фотосинтетическая продуктивность посева.— В кн.: Фотосинтетическая продуктивность растительного покрова. Тарту, 1969, с. 144—173.

145. Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. Энерго-и массообмен в системе растение—почва—воздух.— Л.: Гидрометеониздат, 1975.— 358 с.

146. Ничипорович А. А. Фотосинтез и теория получения высоких урожаев.— В кн.: Тимирязевские чтения, т. 15. М.: изд. АН СССР, 1956, с. 1—94.

147. Ничипорович А. А., Строганова Л. Е., Чмора С. Н. и др. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах.— М.: изд. АН СССР, 1961.— 133 с.

148. Ничипорович А. А. Задачи работ по изучению фотосинтетической деятельности растений как фактора продуктивности.— В кн.: Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности. М.: Наука, 1966, с. 7—50.

149. Ничипорович А. А. Хлорофилл и фотосинтетическая продуктивность растений.— В кн.: Хлорофилл. Минск: Наука и техника, 1974, с. 49—62.

150. Новиков А. Г. Некоторые вопросы объективного анализа агрометеорологической информации и прогноза влагообеспеченности яровой пшеницы.— Труды ИЭМ, 1969, вып. 8, с. 120—130.

151. Носов А. К., Лемаева А. М. О взаимодействии в онтогенезе картофеля материнского клубня и развивавшегося из него растения.— Изв. АН Туркменской ССР, 1955, вып. 1, с. 47—55.

152. Обухов В. М. Урожайность и метеорологические факторы.— М.: Госпланиздат, 1949.— 318 с.

153. Одум Ю. Основы экологии.— М.: Мир, 1975.— 740 с.

154. Осипова О. П., Нюппиева К. А. Кратковременное действие отрицательных температур на фотосинтетический аппарат листьев различных по устойчивости видов картофеля.— В кн.: Хлорофилл. Минск: Наука и техника, 1974, с. 331—339.

155. Палагин Э. Г. Математическое моделирование агрометеорологических условий перезимовки озимых культур.— Л.: Гидрометеониздат, 1981.— 191 с.

156. Паницкий В. В., Коровин А. И. Влияние весенних заморозков на

- содержание пигментов в листьях и конечный урожай растений.— В кн.: Устойчивость растений к низким положительным температурам и заморозкам и пути ее повышения. М.: Наука, 1969.
157. Пасечнюк А. Д. Методическое пособие по составлению прогноза интенсивности полегания посевов ячменя.— М.: Гидрометеиздат, 1973.— 15 с.
 158. Пасов В. М. Прогнозирование урожая ячменя.— Земледелие, 1971, № 11, с. 68—69.
 159. Пасов В. М., Полевой А. Н., Аксарина Е. А. и др. Современное состояние прогнозирования урожайности.— Труды ИЭМ, 1979, вып. 13(91), с. 64—79.
 160. Пасов В. М., Полевой А. Н. Некоторые итоги работ по созданию методов прогнозов урожайности зерновых культур.— Труды ВНИИСХМ, 1980, вып. 1, с. 22—31.
 161. Пермьякова А. Е. Исследование подкапывающих и сепарирующих рабочих органов при уборке картофеля на почвах с пониженной влажностью.— Сельхозмашина, 1957, № 6, с. 6—9.
 162. Пермьякова А. Е. Механизация производства картофеля.— Доклады научной конференции ИКХ. М., 1968, с. 113—123.
 163. Перт С. Дж. Основы культивирования микроорганизмов и клеток.— М.: Мир, 1978.— 331 с.
 164. Петров Г. Д. Исследование грохотов для сепарирования почвы на картофелеуборочных комбайнах.— Сб. научно-исследовательских работ ВНИИСХ машиностроения, 1957, вып. 11, с. 35—54.
 165. Ван дер Планк Я. Устойчивость растений к болезням.— М.: Колос, 1972.— 254 с.
 166. Платонова Л. Н. Долгосрочный прогноз средней областной урожайности хлопчатника с учетом элементов его продуктивности.— Труды Гидрометцентра СССР, 1971, вып. 85, с. 66—74.
 167. Плохинский Н. А. Биометрия.— М.: изд. МГУ, 1970.— 367 с.
 168. Плучик С. Л. Агрометеорологические условия формирования урожая ранних яровых зерновых культур.— В кн.: Агрометеорологические условия и продуктивность сельского хозяйства Нечерноземной зоны РСФСР.— Л.: Гидрометеиздат, 1978, с. 78—87.
 169. Полевой А. Н., Гошко А. П. Опыт разработки метода агрометеорологического прогноза среднего по району урожая картофеля.— Метеорология и гидрология, 1971, № 9, с. 82—87.
 170. Полевой А. Н. Влияние темпов развития картофеля на урожай.— Труды ИЭМ, 1972, вып. 28, с. 113—116.
 171. Полевой А. Н. Влияние агрометеорологических условий на полноту уборки урожая клубней картофеля.— Труды ИЭМ, 1972, вып. 28, с. 117—122.
 172. Полевой А. Н., Мызина Т. И., Татаринова М. А. О применении метода выравнивания и нормализации корреляционных связей для получения зависимостей продуктивности сельскохозяйственных культур от агрометеорологических условий.— Труды ИЭМ, 1973, вып. 3(40), с. 130—137.
 173. Полевой А. Н. Методическое пособие по оценке агрометеорологических условий в период уборки урожая картофеля.— М.: Гидрометеиздат, 1973.— 16 с.
 174. Полевой А. Н. Об оценке состояния посевов и определении фаз развития растений на больших площадях.— Труды ИЭМ, 1973, вып. 1(50), с. 112—119.
 175. Полевой А. Н., Мызина Т. И. Методическое пособие по составлению агрометеорологического прогноза среднеобластной урожайности ярового ячменя в Нечерноземной зоне ЕТС.— М.: Гидрометеиздат, 1973.— 24 с.
 176. Полевой А. Н. Агрометеорологическое обоснование мер борьбы с потерями урожая клубней картофеля при уборке.— М.: Гидрометеиздат, 1973.— 12 с.
 177. Полевой А. Н., Мызина Т. И. Основы метода агрометеорологического прогноза среднеобластной урожайности овса в Нечерноземной зоне ЕТС.— Метеорология и гидрология, 1973, № 12, с. 85—92.
 178. Полевой А. Н., Мызина Т. И. Методическое пособие по составлению агрометеорологического прогноза среднеобластной урожайности овса в Нечерноземной зоне ЕТС.— М.: Гидрометеиздат, 1974.— 16 с.
 179. Полевой А. Н., Мызина Т. И. Основы метода агрометеорологического

- ского прогноза средней областной урожайности ярового ячменя в Нечерноземной зоне ЕТС.—Экспресс-информация ВНИИГМИ—МЦД, Обнинск, 1974, вып. 11(31), с. 8—15.
180. Полевой А. Н. О распределении солнечной радиации в посадках картофеля различной структуры.—Труды ВНИИГМИ—МЦД, 1975, вып. 14, с. 47—53.
 181. Полевой А. Н. Количественная оценка состояния посадок картофеля.—Труды ВНИИГМИ—МЦД, 1975, вып. 14, с. 136—139.
 182. Полевой А. Н., Мызина Т. И. Агрометеорологический прогноз.—Земледелие, 1975, № 3, с. 49—50.
 183. Полевой А. Н. О прогнозе случайной составляющей временных рядов урожайности ярового ячменя.—Метеорология и гидрология, 1975, № 4, с. 84—90.
 184. Полевой А. Н., Мызина Т. И. Изменение структуры влияния агрометеорологических условий на урожайность ярового ячменя.—Метеорология и гидрология, 1975, № 8, с. 82—87.
 185. Полевой А. Н. Об оценке точности определения прироста ботвы и клубней картофеля.—Труды ИЭМ, 1976, вып. 7(66), с. 41—45.
 186. Полевой А. Н., Мызина Т. И. Методические указания по составлению агрометеорологического прогноза среднеобластной урожайности ярового ячменя в Нечерноземной зоне ЕТС.—М.: Гидрометеиздат, 1976.—39 с.
 187. Полевой А. Н., Бринкен Д. А. Агрометеорологическое обслуживание земледелия на осушаемых землях.—М.: Гидрометеиздат, 1977.—14 с.
 188. Полевой А. Н. Агрометеорологические условия и продуктивность картофеля в Нечерноземье.—Л.: Гидрометеиздат, 1978.—118 с.
 189. Полевой А. Н. Модель формирования урожая картофеля.—Экспресс-информация ВНИИГМИ—МЦД, Обнинск, 1978, вып. 1(51), с. 21—28.
 190. Полевой А. Н., Вольвач И. Е. Динамическая модель формирования урожая озимой пшеницы.—Экспресс-информация ВНИИГМИ—МЦД, Обнинск, 1978, вып. 1(51), с. 28—35.
 191. Полевой А. Н., Мызина Т. И. Агрометеорологический прогноз среднеобластной урожайности ярового ячменя.—В кн.: Агрометеорология—Нечерноземью. Л.: Гидрометеиздат, 1978, с. 81—88.
 192. Полевой А. Н. Динамическая модель формирования урожая картофеля.—Метеорология и гидрология, 1978, № 7, с. 79—85.
 193. Полевой А. Н., Сухов Л. Н., Вольвач И. Е. и др. Методическое пособие по составлению прогноза урожайности озимых зерновых культур на осушаемых землях Прибалтики и Белоруссии.—М.: Гидрометеиздат, 1979.—20 с.
 194. Полевой А. Н., Вольвач И. Е., Прихотько В. Г. Метод оценки агрометеорологических условий формирования урожая озимой пшеницы.—Труды ИЭМ, 1979, вып. 13(91), с. 49—57.
 195. Полевой А. Н., Сухов Л. Н., Вольвач И. Е. и др. Метод прогноза урожайности озимых зерновых культур на осушаемых землях Прибалтики и Белоруссии.—Труды ИЭМ, 1979, вып. 13(91), с. 58—63.
 196. Полевой А. Н., Вольвач И. Е. Методическое пособие по оценке агрометеорологических условий формирования урожая озимой пшеницы и ржи.—М.: Гидрометеиздат, 1979.—20 с.
 197. Полевой А. Н., Пасов В. М. Агрометеорологические прогнозы урожайности: проблемы и перспективы.—Труды ИЭМ, 1979, вып. 13(91), с. 3—15.
 198. Полевой А. Н. Метод агрометеорологического прогноза средней областной урожайности картофеля в Нечерноземной зоне Европейской территории РСФСР.—Труды ИЭМ, 1979, вып. 13(91), с. 44—48.
 199. Полевой А. Н. Методическое пособие по составлению агрометеорологического прогноза средней областной урожайности картофеля в Нечерноземной зоне ЕТ РСФСР.—М.: Гидрометеиздат, 1979.—22 с.
 200. Полевой А. Н. Об определении некоторых параметров динамической модели формирования урожая.—Труды ИЭМ, 1979, вып. 13(91), с. 120—130.
 201. Полевой А. Н. Методические указания по оценке агрометеорологических условий в период уборки урожая картофеля.—М.: Гидрометеиздат, 1980.—9 с.
 202. Полевой А. Н., Гончарова Т. А., Вольвач И. Е. и др. Методическое пособие по оценке агрометеорологических условий формирования уро-

- жайности озимой пшеницы и озимой ржи в Нечерноземной зоне РСФСР (на основе декадной агрометеорологической информации).— М.: Гидрометеиздат, 1980.— 41 с.
203. Полевой А. Н., Гончарова Т. А., Рачкулик Ф. С. и др. Методическое пособие по составлению агрометеорологического прогноза среднеобластной урожайности картофеля на ЕТ СССР.— М.: Гидрометеиздат, 1980.— 65 с.
204. Полевой А. Н. Динамико-статистические методы прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур.— Метеорология и гидрология, 1981. № 2, с. 92—102.
205. Полевой А. Н. Методическое пособие по разработке динамико-статистических методов прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур.— М.: Гидрометеиздат, 1981.— 39 с.
206. Полуэктов Р. А., Шулова А. Г. Имитация агрометеорологических процессов применительно к моделям продуктивности сельскохозяйственного поля.— Труды АФИ, 1976, вып. 38, с. 126—135.
207. Полуэктов Р. А., Пых Ю. А., Швытов И. А. Динамические модели экологических систем.— Л.: Гидрометеиздат, 1980.— 288 с.
208. Пономарев Б. П. Оценка агрометеорологических условий произрастания яровой пшеницы в период формирования зерна.— Труды ЦИП, 1959, вып. 88, с. 15—21.
209. Пономарев Б. П. Методические указания по составлению агрометеорологических прогнозов среднеобластной урожайности яровой пшеницы в степной и лесостепной зонах Западной Сибири.— М.: Гидрометеиздат, 1974.— 11 с.
210. Попов С. Р. Особенности в азотном обмене растений при заморозках.— В кн.: Устойчивость растений к низким положительным температурам и заморозкам и пути ее повышения.— М.: Наука, 1969, с. 184—192.
211. Поповская О. М. К методике оценки условий произрастания картофеля в центральных областях Европейской территории СССР.— Труды ЦИП, 1957, вып. 53, с. 43—58.
212. Прихотько В. Г., Полевой А. Н. О возможности пространственного согласования аэрофотометрической и наземной информации.— Труды ИЭМ, 1979, вып. 13(91), с. 95—100.
213. Процеров А. В. Оценка влагообеспеченности яровой пшеницы (овса и ячменя) в период вегетации.— В кн.: Сборник методических указаний по анализу и оценке сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий. Л.: Гидрометеиздат, 1957, с. 49—53.
214. Процеров А. В. Агрометеорологические прогнозы (история возникновения, развитие, состояние и задачи).— Труды Гидрометцентра СССР, 1967, вып. 9, с. 3—10.
215. Рабинович Е. Фотосинтез. Ч. 2, 1953.
216. Рабинович Е. Фотосинтез.— М.: изд-во иностр. лит., 1959.— 936 с.
217. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. О связи надземной массы пшеницы с урожаем зерна.— Труды САРНИГМИ, 1973, вып. 64(79), с. 91—94.
218. Реуцкая Л. М. Влияние инфекции на активность фотосинтеза питающего растения.— Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. наук. Минск, 1969.— 28 с.
219. Росс В. Продуктивность и ростовые функции некоторых сельскохозяйственных культур.— В кн.: Фотосинтез и продуктивность растительного покрова. Тарту, изд. ИФА АН ЭССР, 1968, с. 111—130.
220. Росс Ю. К. К математической теории фотосинтеза растительного покрова.— ДАН СССР, 1964, т. 157, № 5, с. 1239—1242.
221. Росс Ю. К. К математическому описанию роста растений.— ДАН АН СССР, 1966, 171, № 2, с. 481—483.
222. Росс Ю. К. Система уравнений для количественного роста растений.— В кн.: Фитоактинометрические исследования растительного покрова. Таллин: Валгус, 1968, с. 64—89.
223. Росс Ю., Бихеле З. Расчет фотосинтеза растительного покрова.— В кн.: Фотосинтетическая продуктивность растительного покрова. Тарту, 1969, с. 5—43.
224. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— 341 с.

225. Рубин Б. А., Арциховская Е. В., Озерецковская О. Л. Дыхание растений.— Физиология сельскохозяйственных растений, т. 1.—М.: изд. МГУ, 1967, с. 354—493.
226. Рубин Б. А., Арциховская Е. В., Аксенова В. А. Биохимия и физиология иммунитета растений.—М.: Высшая школа, 1975.—416 с.
227. Руководство по составлению агрометеорологических прогнозов.—Л.: Гидрометеиздат, 1962.—270 с.
228. Сабинин Д. А. Физиология развития растений.—М.: изд. АН СССР, 1963.—196 с.
229. Сакун В. А. О рациональном уравнении процесса роста растений.— Вестник сельскохозяйственной науки, 1973, № 7, с. 81—86.
230. Самыгин Г. А. Причины вымерзания растений.—М., 1974.—191 с.
231. Свисюк И. В. Прогнозирование среднего областного урожая ярового ячменя и яровой пшеницы.— Метеорология и гидрология, 1971, № 7, с. 80—86.
232. Сенников В. А., Сляднев А. П. Агроклиматические ресурсы юго-востока Западной Сибири и продуктивность зерновых культур.—Л.: Гидрометеиздат, 1972.—149 с.
233. Сивков С. И. Методы расчета характеристик солнечной радиации.—Л.: Гидрометеиздат, 1968.—232 с.
234. Сидоренкова А. Н. Расчет сроков начала полевых работ и сева ранних яровых зерновых культур в нечерноземной зоне Европейской территории РСФСР.— Метеорология и гидрология, 1969, № 1, с. 74—77.
235. Сиротенко О. Д. Многомерный регрессионный анализ как метод исследования связи урожая сельскохозяйственных культур с гидрометеорологическими факторами.— Метеорология и гидрология, 1969, № 12, с. 68—78.
236. Сиротенко О. Д., Бойко А. П. Динамическая модель агроценоза.— Труды ИЭМ, 1977, вып. 8 (67), с. 12—36.
237. Сиротенко О. Д. Физико-математическое моделирование в агрометеорологии.— Метеорология и гидрология, 1978, № 3, с. 80—88.
238. Сиротенко О. Д., Просвиркина А. Г. Метод количественной оценки агрометеорологических условий формирования урожая ярового ячменя (для нечерноземной зоны Европейской территории СССР). Методическое пособие.—М.: Гидрометеиздат, 1979.—32 с.
239. Сказкин Ф. Д. Критический период у растений по отношению к недостатку воды в почве.—Л.: Наука, 1971.—120 с.
240. Слейчер Р. Водный режим растений.—М.: Мир, 1970.—365 с.
241. Соловей И. И. Результаты поточной уборки картофеля на тяжелых почвах пониженной влажности.—Сб. научно-исследовательских работ Орловской гос. с.-х. опын. ст., 1966, вып. 3, с. 272—282.
242. Страшный В. Н. Влияние агрометеорологических условий на качество урожая озимой пшеницы.— Метеорология и гидрология, 1975, № 10, с. 92—98.
243. Строганова Л. Е. Основные элементы фотосинтетической продуктивности картофеля.— В кн.: Проблемы фотосинтеза. М.: изд. АН СССР, 1959, с. 434—447.
244. Стэкмен Э., Харрар Дж. Основы патологии растений.—М., 1959.—540 с.
245. Сухов Л. Н. Методическое пособие по составлению агрометеорологического прогноза средней областной урожайности озимой ржи в центральной черноземной зоне и Среднем Поволжье.—Л.: Гидрометеиздат, 1975.—14 с.
246. Сытник К. М., Мусатенко Л. И., Богданова Т. Л. Физиология листа.— Киев: Наукова думка, 1978.—392 с.
247. Сычева З. Ф. О некоторых свойствах белкового комплекса вегетативных органов растений в связи с их устойчивостью к отрицательным температурам.— Уч. зап. Петрозаводского ун-та, 1971, т. 17, в. 6, с. 92—101.
248. Сычева З. Ф., Васюкова В. А. Влияние заморозков и закалывания холодом на дыхательный метаболизм активно вегетирующих растений.— Физиология растений, 1972, т. 19, в. 4, с. 824—830.
249. Сычева З. Ф. Влияние повреждающих заморозков на некоторые физиолого-биохимические процессы у растений.— В кн.: Эколого-физиологические аспекты устойчивости растений к заморозкам. Л.: Наука, 1977, с. 86—114.
250. Тарр С. Основы патологии растений.—М.: Мир, 1975.

251. Тарчевский И. А. Фотосинтез пшеницы.— В кн.: Физиология сельскохозяйственных растений. М.: изд. МГУ, 1969, т. 4, с. 298—362.
252. Тарчевский И. А. Основы фотосинтеза.— М.: Высшая школа, 1977.— 256 с.
253. Томин Ю. А., Федосеев А. П. К вопросу пространственной характеристики изменчивости урожайности пастбищ.— Труды ИЭМ, 1970, вып. 18, с. 19—26.
254. Тооминг Х. Г. Некоторые задачи агрометеорологии в связи с программированием урожаев.— Научные основы программирования урожаев сельскохозяйственных культур. Тезисы докладов II Всесоюзной конференции. Уфа, 17—20 июня 1973 г.— М., 1975, с. 37—39.
255. Тооминг Х. Г. Солнечная радиация и формирование урожая.— Л.: Гидрометеиздат, 1977.— 200 с.
256. Тооминг Х., Мясгалу Х., Кыйва П. и др. Программирование максимальных урожаев картофеля.— Вестник сельскохозяйственной науки, 1978, № 2, с. 110—117.
257. Туркова Н. С. Дыхание растений.— М.: изд. МГУ, 1963.— 292 с.
258. Уланова Е. С. Методы агрометеорологических прогнозов.— Л.: Гидрометеиздат, 1959.— 280 с.
259. Уланова Е. С. Методическое пособие по составлению долгосрочного прогноза урожая озимой пшеницы в районах черноземных почв Украины, Северного Кавказа и Молдавии.— М.: Гидрометеиздат, 1965.— 30 с.
260. Уланова Е. С. Главные инерционные агрометеорологические факторы для формирования урожаев озимой пшеницы в черноземной зоне и долгосрочный прогноз ее урожайности.— Труды Гидрометцентра СССР, 1967, вып. 9, с. 10—22.
261. Уланова Е. С. Методические указания по составлению долгосрочных агрометеорологических прогнозов средней областной урожайности озимой пшеницы на Украине, Северном Кавказе, в Молдавии и Нижнем Поволжье. Л.: Гидрометеиздат, 1969.— 30 с.
262. Уланова Е. С. Агрометеорологические условия и урожайность озимой пшеницы.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— 302 с.
263. Уланова Е. С. Методические указания по составлению долгосрочных прогнозов урожайности озимой пшеницы в основных районах ее возделывания.— Л.: Гидрометеиздат, 1977.— 48 с.
264. Уланова Е. С. Агрометеорологическое обслуживание сельского хозяйства.— Метеорология и гидрология, 1978, № 1, с. 86—94.
265. Федоров Е. К. Погода и урожай.— Л.: Гидрометеиздат, 1973.— 57 с.
266. Федосеев А. П. Климат и пастбищные травы Казахстана.— Л.: Гидрометеиздат, 1964.— 317 с.
267. Федосеев А. П. Агротехника и погода.— Л.: Гидрометеиздат, 1979.— 240 с.
268. Фомин С. В., Беркинблит М. Б. Математические проблемы в биологии.— М.: Наука, 1973.— 200 с.
269. Форрестер Дж. Мировая динамика.— М.: Наука, 1978.— 167 с.
270. Френкель А. А. Математические методы анализа динамики и прогнозирования производительности труда.— М.: Экономика, 1972.— 189 с.
271. Ханин М. А., Дорфман Н. Л., Бухаров И. Б. и др. Экстремальные принципы в биологии и физиологии.— М.: Наука, 1978.— 256 с.
272. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— 371 с.
273. Хваленский Ю. А. Об основных направлениях агрометеорологических исследований.— Метеорология и гидрология, 1977, № 12, с. 3—9.
274. Хит О. Фотосинтез.— М.: Мир, 1972.— 316 с.
275. Худякова А. И. О некоторых элементах фотосинтетической системы посевов, определяющих урожай картофеля на юге Приморского края.— Труды ДВНИГМИ, 1977, вып. 59, с. 53—57.
276. Церцвадзе Ш. И. Методика прогноза урожая цитрусовых культур.— Труды ЗапНИГМИ, 1969, вып. 33(39), с. 103—114.
277. Цубербиллер Е. А. Агрометеорологические критерии суховея.— В кн.: Суховей, их происхождение и борьба с ними. М.: изд. АН СССР, 1957.

278. Цубербиллер Е. А. Методика агрометеорологического прогноза урожая картофеля.— Труды ЦИП, 1965, вып. 145, с. 157—168.
279. Цубербиллер Е. А. Пути повышения урожайности картофеля.— Л.: Гидрометеиздат, 1969.— 45 с.
280. Чернышева Л. С. О прогнозе урожая риса в Приморском крае.— Труды ДВНИГМИ, 1974, вып. 48, с. 3—7.
281. Чирков Ю. И. Оценка агрометеорологических условий произрастания кукурузы.— Труды ЦИП, 1960, вып. 98, с. 6—18.
282. Чирков Ю. И. Методическое пособие по оценке агрометеорологических условий произрастания кукурузы.— Л.: Гидрометеиздат, 1961.— 21 с.
283. Чирков Ю. И. Пути более полного использования климатических ресурсов для фотосинтетической деятельности посевов кукурузы.— В кн.: Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. М.: изд. АН СССР, 1963, с. 88—98.
284. Чирков Ю. И. Основы долгосрочного агрометеорологического прогноза урожая зерна кукурузы.— Метеорология и гидрология, 1965, № 9, с. 3—7.
285. Чирков Ю. И. Методическое пособие по составлению прогноза урожайности зерна кукурузы.— М.: Гидрометеиздат, 1965.— 12 с.
286. Чирков Ю. И. Агрометеорологические условия и продуктивность кукурузы.— Л.: Гидрометеиздат, 1969.— 251 с.
287. Чирков Ю. И. Развитие методов агрометеорологических прогнозов урожая сельскохозяйственных культур.— В кн.: Агрометеорологические аспекты повышения продуктивности земледелия. Л.: Гидрометеиздат, 1970, с. 67—75.
288. Чмора С. Н., Оя В. Изучение температурной зависимости фотосинтеза листа.— Физиология растений, 1967, т. 14, № 4, с. 603—611.
289. Чугай В. Г. Метод прогноза урожайности озимой пшеницы новых сортов интенсивного типа на Украине.— Метеорология и гидрология, 1978, № 4, с. 88—92.
290. Шатилов И. С., Ваулин А. В. Динамика ассимилирующей поверхности и роль отдельных органов растений в формировании урожая ячменя.— Изв. ТСХА, 1972, вып. 1, с. 21—29.
291. Шатилов И. С., Полетаев В. В. Интенсивность фотосинтеза различных ярусов листьев картофеля, фотосинтетический потенциал и урожай клубней.— Изв. ТСХА, 1975, вып. 2, с. 27—36.
292. Шатилов И. С., Назарян Г. Х. Интенсивность дыхания подземных органов картофеля в полевых условиях.— Доклады ВАСХНИЛ, 1978, 11, с. 8—9.
293. Шатилов И. С., Шаров А. Ф. Фотосинтетический потенциал, интенсивность фотосинтеза и роль отдельных органов растений в формировании биологического урожая озимой пшеницы на разных агрофонах.— Сельскохозяйственная биология, 1978, т. 13, вып. 1.
294. Шатилов И. С., Шаров А. Ф. Дыхательная активность органов растений озимой пшеницы в полевых условиях.— Вестник сельскохозяйственной науки, 1978, № 3, с. 6—14.
295. Шатилов И. С., Чудновский А. Ф. Агрофизические, агрометеорологические и агротехнические основы программирования урожая.— Л.: Гидрометеиздат, 1980.— 318 с.
296. Шевелуха В. С., Маханько Л. А. Суточная периодичность линейного роста и ее связь с ходом формирования урожая.— Физиология растений, 1972, т. 19, вып. 1.
297. Шевелуха В. С. Периодичность роста сельскохозяйственных растений и пути ее регулирования. Минск: Ураджай, 1977.— 423 с.
298. Шелудякова Р. М. Основы методики прогноза урожая картофеля для территории УССР.— Труды УкрНИГМИ, 1977, вып. 159, с. 42—48.
299. ШигOLEV А. А. Температура как количественный агрометеорологический показатель скорости развития растений и некоторых элементов их продуктивности.— Труды ЦИП, 1957, вып. 53, с. 75—82.
300. Штоккер О. Физиологические и морфологические изменения в растениях, обусловленные недостатком воды.— В кн.: Растение и вода. Л.: Гидрометеиздат, 1967, с. 128—203.
301. Шульгин А. М. Агрометеорология и агроклиматология.— Л.: Гидрометеиздат, 1978.— 200 с.

302. Шульгин И. А. Растение и Солнце.— Л.: Гидрометеиздат, 1973.— 252 с.
303. Эпифитотни болезней растений.— М.: Колос, 1979.— 208 с.
304. Янко Р. В., Янко В. М. К вопросу математического описания процессов роста растений.— Сельскохозяйственная биология, 1979, т. 14, № 5, с. 644—649.
305. Alden T., Hermann R. K. Aspects of the cold-hardiness mechanism in plants.— *The Bot. Rev.*, 1971, v. 37, N 1, p. 37—142.
306. Arkin G. P., Vanderlip R. L., Ritchie J. T. A dynamic grain sorghum growth model.— *Trans. ASAE*, 1976, v. 19, N 4, p. 622—626, 630.
307. Baier W., Williams G. D. V. Regional wheat yields predictions from weather data in Canada.— *WMO Symp. on Agrometeorology of the Wheat Crop*, Braunschweig, 1973, p. 265—283.
308. Baier W. Crop-weather models and their use in yield assessments.— *Intern. Rep. Agromet*, Canada Dep. Agric., 1975, N 29, p. 64.
309. Baier W. Note on the terminology of crop-weather models.— *Agric. Met.*, 1979, v. 20, N 2, p. 137—145.
310. Baker D. N., Musgrave R. B. The effects of low level moisture stresses on the rate of apparent photosynthesis in corn.— *Crop Sci.*, 1964, N 3, v. 4, p. 249—253.
311. Baker D. N., Hesketh J. D., Duncan W. G. Simulation of growth and yield in cotton. I. Gross photosynthesis, respiration and growth.— *Crop Sci.*, 1972, v. 12, p. 431—433.
312. Barnes A., Greenwood D. J., Cleaver T. J. A dynamic model for the effects of potassium and nitrogen fertilizers on the growth and nutrient uptake of crops.— *J. Agric. Sci.*, 1976, v. 86, p. 225—244.
313. Biender V. J. Analyse und frühzeitige Prognose des Hektarertrages von Winterweizen in Österreich.— *Bodenkultur*, 1977, Bd 28, N 3, S. 263—276.
314. Brouwer R. Morphological and physiological adaptations to external conditions.— *Acta Bot. Niderl.*, 1968, v. 17, N 1, p. 78—84.
315. Bull T. A., Tovey D. A. Aspects of modelling sugarcane growth by computer simulation.— *Sugar J.*, 1975, v. 38, N 3, p. 50—55.
316. Byrne G. J., Tognetti K. Simulation of pasture environment interaction.— *Agric. Met.*, 1969, v. 6, N 3, p. 151—163.
317. Chartier P. Etude theorique de l'assimilation brute de la feuille.— *Ann. Physiol. Veg.*, 1966, v. 8, N 3, p. 167—196.
318. Claus S. Zur Modellierung von Teilsystem bei der Stoffproduktion von Pflanzen.— *Biophys. Anal. pflanzlicher System*, 1977, p. 56—59.
319. Coble C. G., Bowen H. D., King H. G. MOIST: A simulation of the moisture profile of a bare soil after planting.— In: *Computer simul. of a cotton prod. system*, US Manual, ARS-J-52, 1975, p. 4—11.
320. Colwick R. F., Jones J. W. Scope and application.— In: *Computer simul. of a cotton prod. system*, US Manual, ARS-J-52, 1975, p. 1—3.
321. Curry R. B. Dynamic simulation of plant growth. I. Development of a model.— *Trans. ASAE*, 1971, v. 14, N 5, p. 946—959.
322. Curry R. B., Chen L. N. Dynamic simulation of plant growth. II. Incorporation of actual daily weather and partitioning of net photosynthate.— *Trans. ASAE*, 1971, v. 14, N 6, p. 1170—1174.
323. Curry R. B., Baker C. H., Streeter J. G. SOYMOD 1. A dynamic simulator of soybean growth and development.— *Trans. ASAE*, 1975, v. 18, N 5, p. 963—968, 974.
324. Davidson J. L., Philip J. R. Light and pasture growth.— In: *Climatology and Microclimatology*, UNESCO, 1958, p. 181—187.
325. Erickson R. O. Modelling of plant growth.— *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 1976, v. 27, p. 407—434.
326. Fick G. W., Williams W. A., Loomis R. S. Computer simulation of dry matter distribution during sugar beet growth.— *Crop Sci.*, 1973, v. 13, N 4, p. 413—417.
327. Fick G. W. A pasture production model for use in a whole farm simulator.— *Agr. Syst.*, 1980, v. 5, N 2, p. 137—161.
328. Fisher R. The influence of rainfall on the yield of wheat at Rothamsted.— *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 1925, Ser. B, V, 213.

329. Fukai S., Silsbury J. H. A growth model for *Trifolium subterraneum* L. Swards.— *Austral. J. Agric. Res.*, 1978, v. 29, N 1, p. 51—65.
330. Gaastra P. Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature, and stomatal diffusion resistance.— *Model. Landbouwhogeschool, Wageningen*, 1959, v. 59, N 13, p. 1—68 (цит. по [15]).
331. Goudriaan J. Crop micrometeorology: a simulation study.— Centre for agricultural publishing and documentation, Pudoc, Wageningen, 1977, p. 249.
332. Greenwood D. J., Wood J. T., Cleaver T. J. A dynamic model for the effects of soil and weather conditions on nitrogen response.— *J. Agric. Sci.*, 1974, v. 82, N 3, p. 455—467.
333. Hackett C., Sands P. T., Nix H. A. A model of the development and bulking of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). II. Prediction of district commercial yields.— *Field Crops Res.*, 1979, v. 2, N 4, p. 333—347.
334. Hackett C., Sands P. T., Nix H. A. A model of the development and bulking of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). III. Some implications for potato production and research.— *Field Crops Res.*, 1979, v. 2, N 4, p. 349—364.
335. Haun J. R. Prediction of spring wheat yields from temperature and precipitation data.— *Agron. J.*, 1974, v. 66, N 3, p. 405—409.
336. Hellwig Z. Schemat budowy prognozy statycznej metody wag harmonicznych.— *Przegląd Statyst.*, 1967, v. 14, N 2, p. 133—153.
337. Hesketh J. D., Baker D. N., Duncan W. G. Simulation of growth and yield in cotton: respiration and the carbon balance.— *Crop Sci.*, 1971, v. 11, N 3, p. 394—398.
338. Hesketh J. D., Baker D. N., Duncan W. G. Simulation of growth and yield in cotton. II. Environmental control of morphogenesis.— *Crop Sci.*, 1972, v. 12, p. 436—439.
339. Hesketh J. D., Jones J. W. Some comments on computer simulators for plant growth.— *Ecol. Modelling*, 1976, v. 2, p. 235—247 (цит. по [309]).
340. Hodges T., Kanemasu E. T. Modelling daily dry matter production of winter wheat.— *Agron. J.*, 1977, v. 69, N 6, p. 974—978.
341. Hodges T., Kanemasu E. T., Teare I. D. Modelling dry matter accumulation and yield of grain sorghum.— *Can. J. Plant Sci.*, 1979, v. 59, N 3, p. 803—818.
342. Horie T. Simulation of sunflower growth. I. Formulation and parametrization of dry matter production, leaf photosynthesis, respiration and partitioning of photosynthates.— *Bull. Nat. Inst. Agric. Sci. Jap., Ser. A24*, 1977, p. 45—70.
343. Huda A. R. S., Ghildyal B. P., Tomor V. S. Contribution of climatic variables in predicting maize yields under monsoon conditions.— *Agr. Met.*, 1976, v. 17, N 1, p. 33—47.
344. Jones J. W., Hesketh J. D., Kamprath E. J., Bowen H. D. Development of a nitrogen for cotton growth models: a first approximation.— *Crop Sci.*, 1974, v. 14, N 4, p. 541—546.
345. Jones J. W., Colwick R. F., Wanjura D. F., Hudspeth E. B. HARVSIM: A simulation of cotton harvesting and ginning.— In: *Computer simul. of a cotton prod. system, US Manual, ARS-J-52*, 1975, p. 83—101.
346. Jones J. W., Smerage G. H. Representation of plant/crop physiology.— *ASAE Techn. Paper*, 1978, N 78—4024.
347. Kaiser H. W., De Jager J. M. Partitioning of dry matter in maize.— *Gewasproduktie/Crop Production*, 1977, v. 6, p. 81—86.
348. Kaiser H. W., De Jager J. M. Plant and crop physiological parameters determining the environmental control of maize crop production.— *Gewasproduktie/Crop Production*, 1977, v. 6, p. 96—103.
349. Lach G. System und Produkt im Verlauf der Vegetation bei Sommerweizen in Abhängigkeit von der Stickstoffernährung.— *Zeitschr. für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1970, Bd 127, N 3, S. 242—251.
350. Lach G. Der Einfluss variierteter Vegetationstemperaturen auf das Systemwachstum des Sommerweizens.— *Zeitschr. für Pflanzenern. und Bodenkunde*, 1971, Bd 129, N 2, S. 132—141.
351. Linser H., Lach G., Titze L. Systemwachstum und Produktwachstum bei Weizen und Ölrettich.— *Zeitschr. für Pflanzenern. und Bodenkunde*, 1968, Bd 121, N 3, S. 199—211.

352. Lommen P. W., Schwintzer C. R., Yocum C. S., Gates D. M. A model describing photosynthesis in terms of gas diffusion and enzyme kinetics.— *Planta*, 1971, v. 98, N 3, p. 195—220.
353. Loomis R. S., Rabbinge R., Ng E. Explanatory models in crop physiology.— *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 1979, v. 30, p. 339—367.
354. Lundegårdh H. Klima und Boden in ihrer Wirkung auf das Pflanzenleben.— *Jena*, 1949, S. 484.
355. Maracchi G. Simulazione di una cultura di mais.— *Rivista Agron.*, 1978, N 1—2, p. 103—109.
356. Mazur P. Freezing injury of plants.— *Ann. Rev. Plant Phys.*, 1969, v. 20, p. 419—445.
357. McKinion J. M., Baker D. N., Hesketh J. D., Jones J. W. SIMCOT II: A simulation of cotton growth and yield.— In: *Computer simulation of a cotton production system: User's Manual*, 1975, US Dept. Agric Res., Ser. V (Rep.), ARS-S-52, p. 27—82.
358. McKinion J. M., Jones J. W., Hesketh J. D. A system of growth equations for the continuous simulation of plant growth.— *Trans. ASAE*, 1975, N 5, v. 18, p. 975—979, 984.
359. McCree K. J. An equation for the rate of respiration of white clover plants grown under controlled conditions.— In: *Pred. and measurement of photosynthetic prod.*, PUDOC, Wageningen, 1970, p. 221—229.
360. McCree K. J. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as functions of dry weight, photosynthetic rate and temperature.— *Crop Sci.*, 1974, v. 14, N 4, p. 509—514.
361. McQuigg J. D. Modelling the impact of climatic variability for the purpose of estimating grain yields.— In: *Modelling Climate — Plants — Soils*, Proc. Symp. Univ. Guelph, 1976, p. 4—18 (цит. по [309]).
362. Miles G. E. e. a. Simulation of alfalfa growth.— *ASAE Paper*, 1973, N 73—4547, ASAE St. Joseph, M 1 49085.
363. Miles G. E., Peart R. M., Holt D. A. The development and use of physiologically based crop models.— *ASAE Paper*, 1976, N 76—4503, p. 12.
364. Monsi M., Sakki T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion.— *Jap. J. Bot.*, 1953, N 14, p. 22—52.
365. Newman J. E. Applying meteorology to agriculture.— *Editor. Agric. Met.*, 1974, v. 13, N 1, p. 1—3.
366. Noy-Meir I. Grazing and production in seasonal pastures: analysis of a simple model.— *J. Appl. Ecol.*, 1978, v. 15, N 3, p. 809—835.
367. Patfield W. M., Austin R. B. A model for the simulation of the growth of *Beta vulgaris*.— *Ann. Bot.*, 1971, v. 35, N 143, p. 1227—1250.
368. Penning de Vries F. W. T. Substrate utilization and respiration in relation to growth and maintenance in higher plants.— *Neth. J. Agric. Sci.*, 1974, v. 22, N 1, p. 40—44.
369. Penning de Vries F. W. T., Brunsting A. H. M., Laar van H. H. Product, requirements and efficiency of biosynthesis: a quantitative approach.— *J. Theoret. Biol.*, 1974b, v. 45, p. 339—377.
370. Penning de Vries F. W. T. The cost of maintenance processes in plant cells.— *Ann. Bot.*, 1975, v. 39, N 159, p. 77—92.
371. Pochop L. O., Cornia R. L., Becker C. F. Prediction of winter wheat yield from short-term weather factors.— *Agron. J.*, 1975, v. 67, N 1, p. 4—7.
372. Richards R. J. The quantitative analysis of growth.— *Plant Physiol.*, 1969, v. VA, p. 3—76.
373. Rickman R. W., Ramig R. E., Allmaras R. R. Modelling dry matter accumulation in dryland winter wheat.— *Agron. J.*, 1975, v. 67, N 3, p. 283—289.
374. Ryhinder A. H., Matsuda M. Effect of plant density and water supply on wheat production.— *Neth. J. Agric. Sci.*, 1978, v. 26, N 2, p. 200—209.
375. Sands P. J., Hackett C., Nix H. A. A model of the development and bulking of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). I. Derivation from well-managed field crops.— *Field Crops Res.*, 1979, v. 2, N 4, p. 309—331.
376. Sauer R. H. A simulation model for grassland primary producer phenology and biomass dynamics.— *Ecol. Stud.*, 1978, v. 26, p. 55—87.

377. Shawcroft R. W., Lewon E. R., Allen L. H., Stewart D. W., Jensen S. E. The soil—plant—atmosphere model and some of its predictions.—Agric. Met., 1974, v. 14, N 1/2, p. 287—307.
378. Sheehy J. E., Cobby J. M., Ryle G. J. A. The growth of perennial ryegrass: a model.—Ann. Bot., 1979, v. 43, N 3, p. 335—354.
379. Slabbers P. J., Herrendorf V. S., Stapper M. Evaluation of simplified water—crop yield models.—Agric. Weather Management, 1972, v. 2, p. 95—129.
380. Splinter W. E. Corn growth model.—ASAE Paper, 1973, N 73—4535. ASAE St. Joseph, MI 49085.
381. Splinter W. E. Modelling of plant growth for yield prediction.—Agric. Met., 1974, v. 14, N 1/2, p. 243—245.
382. Stapleton H. M., Meyers R. P. Modelling subsystems for cotton—the cotton plant simulation.—Trans. ASAE, 1971, v. 14, N 5, p. 950—953.
383. Stewart D. W. Modelling plant-atmosphere systems.—In: Impacts of Climatic Change on the Biosphere. CIAP Monogr. 5, P. 2, Climatic Effects. 1975. (цит. по [309]).
384. Struik G. J., Bray J. R. Root-shoot relations of native forest herbs and Zea mays at different soil moisture levels.—Ecology, 1970, v. 51, p. 892—893.
385. Strümpfel J. Untersuchungen über die Möglichkeiten einer Ertragsvoraussage bei Winterweizen durch Bestimmung von Bestandesmerkmalen.—Arch. Acker- und Pflanzenbau Bodenkunde, 1975, Bd 219, N 4, S. 287—299.
386. Stüdemann O. Zur Ertragsprognose und zur Bestimmung witterungsbedingter Ertragsschwankungen auf einem entwässerten lehmigen Moränenstandort im Nordmecklenburgischen Küstenclimabezirk.—Arch. Acker- und Pflanzenbau Bodenkunde, 1974, Bd 18, N 2/3, S. 203—216.
387. Takeda G., Iwaki H., Takayanagi S. Ecological studies on the photosynthesis of winter cereals. IV. Model simulation of dry matter growth of six-rowed barley.—Jap. J. Crop Sci., 1977, v. 46, N 2, p. 178—192.
388. Thornley J. H. M. Mathematical models in plant physiology. A quantitative approach to problems in plant and crop physiology.—London; New York: Acad. Press, 1976, p. 318.
389. Tooming H. Mathematical description of net photosynthesis, growth and adaptation processes in the photosynthetic apparatus of plant communities.—In: Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity, Wageningen, Pudoc, 1970, p. 103—114.
390. Vanderlip R. L., Arkin G. P. Simulating accumulation and distribution of dry matter in grain sorghum.—Agronomy J., 1977, v. 69, N 6, p. 917—927.
391. Wanjura D. F. EMERGE: A simulation of cotton germination and emergence.—In: Computer simul. of a cotton prod. system, US. Manual, ARS-S-52, 1975, p. 12—26.
392. Wann M., Raper C. D., Lucas H. L. A dynamic model for plant growth: a simulation of dry matter accumulation for tobacco.—Photosynthetica, 1978, v. 12, N 2, p. 121—136.
393. Wann M., Raper C. D. Dynamic model for plant growth: adaptation for vegetative growth of soybean.—Crop Sci., 1979, v. 19, N 4, p. 461—467.
394. Warembourg F. R., Paul E. A., Randell R. L., More R. B. Modèle de répartition du carbone assimilé dans une prairie naturelle.—Oecologia Plantarum, 1979, v. 14, N 1, p. 1—12.
395. Williams G. D. V., Robertson G. W. Estimating most probable prairie wheat production from precipitation data.—Canad. J. Soil Sci., 1965, v. 45, p. 34—37.
396. Winzeller H., Hunt L. A., Maken L. D. Ontogenetic changes in respiration and photosynthesis in a unicum barley.—Crop Sci., 1976, v. 16, N 6, p. 786—790.
397. Wit de C. T. Photosynthesis of leaf canopies.—Agric. Res. Rep., Wageningen, 1965, N 663, p. 1—57.
398. Wit de C. T., Brouwer R. Über ein dynamisches Modell des vegetativen Wachstums von Pflanzenbeständen.—Angewandte Botanik, 1968, Bd 42, N 1/2, S. 1—12.

399. Wit de C. T., Brouwer R., Penning de Vries F. W. T. The simulation of photosynthetic system.— In: Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity, Pudoc, Wageningen, 1970, p. 47—70.
400. Wit de C. T. e. a. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops.— Wageningen, Pudoc, 1978, 141 p.
401. Yokoi Y. Growth and reproduction in higher plants. I. Theoretical analysis by mathematical models.— Bot. Mag., Tokyo, 1976, N 89, p. 1—14.
402. Zelawski W., Lech A. Logistic growth functions and their applicability for characterizing dry matter accumulation in plants.— Acta Physiol. Plant., 1980, v. 2, p. 187—194.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Агрометеорологическая информация
 - — входная 118
 - — декадная 120
 - — начальная 118, 124
 - — суточная 118
- Агрометеорологические прогнозы 125
 - —, методы оценки 115, 118, 120
- Адаптация 29, 39
- Адекватность модели 89
- Азот 22, 23, 25
- Архитектоника растительного покрова 23
- Ассимилянты, их распределение 18
 - , фонд 19, 21, 24

Б

- Белок 65
- Биомасса зерна 23, 35, 117, 119
 - клубней 36
 - колоса 34
 - корней 34, 39
 - листьев 34
 - общая 34, 39
 - органов 34
 - стеблей 34
 - функционирующая 34
- Болезни 42
 - и дыхание 43
 - и площадь ассимилирующей поверхности 44
 - и температура воздуха 43
 - , и фотосинтез 43
 - , и функционирующая биомасса 44

В

- Влажность почвы 16, 32, 50, 51, 54
 - завядания 137
- Влагоемкость наименьшая 32
- Водный дефицит 21, 39
- Время биологическое 56
 - календарное 56
- Высота растений 140

Г

- Гармонические веса 133
 - коэффициенты 133

- Географическая широта 44, 118
 - изменчивость параметров 5, 97
- Горох 126
- Гречиха 126
- Грунтовые воды 45
 - —, расход в зону аэрации 45
 - —, уровень 46
- Густота стояния растений 36

Д

- Дефицит влажности воздуха 45, 11
- Дыхание 17, 21, 32
 - , коэффициенты 32, 49, 53
 - поддержания 17, 32
 - роста 17, 32
 - темновое 17

З

- Заморозки 40, 41, 114
 - и дыхания 41
 - и площадь ассимилирующей поверхности 41
 - и ростовые функции 42
 - и световая кривая фотосинтеза 4
- Запасы питательных веществ 36
 - продуктивной влаги 32, 118, 121
- Засуха 38, 112
 - и прирост биомассы посевов 39
 - и распределение ассимилятов 39
- Зерно 35
- Злаковые травы 27

И

- Идентификация 47
- Индекс репродукции 19
- Интенсивность фотосинтеза посева
 - в реальных условиях среды 31
 - при оптимальных условиях 30
 - при световом насыщении 30
- Инфильтрация 45
- Испарение 45
- Испаряемость 45

К

- Калий 22
- Капуста 25

Картофель 28, 36, 71, 102, 113
 Клевер 17
 Клубни 36, 135
 Колос 35
 Корни 34, 39
 Коэффициенты
 — водоотдачи грунтов 46
 — дыхания 32, 49, 53
 — корреляции 139, 140
 — уравнения регрессии 136, 141, 142
 — хозяйственной эффективности 110, 114
 Кукуруза 22, 23
 Кустистость продуктивная 36

Л

Лен 126
 Листья 32, 34
 Люцерна 26

М

Материнский клубень 36
 Матрицы ростовые 19
 Методы прогноза урожайности 125, 126, 133, 135, 137
 Модель продукционного процесса 47
 — — —, адекватность 47, 89
 — — — длиннопериодная динамическая 14, 21
 — — — короткопериодная динамическая 14
 — — — статистическая 14
 — — —, структура 29
 — — —, чувствительность 47, 89

Н

Наименьшая влагоемкость 32
 Норма высева 110, 112

О

Облачность 45
 Овес 22, 71, 100
 Огурцы 50
 Онтогенетическая кривая дыхания 33, 53
 — — фотосинтеза 31, 52
 Органы растения
 — —, отмирание 63
 — —, старение 63

Органогенез, этапы 58
 Осадки 45
 Оценка агрометеорологических условий 105, 116
 — влагообеспеченности 116
 — географической изменчивости параметров 97, 143
 — параметров 70
 Ошибки моделей 86
 — прогнозов 137, 142
 — ростовых функций 79

П

Пастбища 26
 Переток ассимилятов
 — — в корни 39
 — — в репродуктивные органы 34, 35
 — — из материнского клубня 36
 Период вегетации 72
 — — межфазный 72
 Площадь ассимилирующей поверхности 22
 Подсолнечник 26
 Прирост биомассы 48, 87
 Прогнозы агрометеорологические 125
 — — динамико-статистические 126
 — — статистические 137
 — — по одному временному ряду 132
 Продолжительность межфазного периода 139
 — солнечного сияния 44, 119
 Поражение инфекцией 42
 Продуктивная кустистость 36
 Продуктивность посева 105, 108
 Пшеница яровая 21, 22
 — озимая 22, 71, 100, 106, 109

Р

Радиация солнечная 26
 — — суммарная 45
 — фотосинтетически активная 30
 Развитие 23
 Райграс 26
 Распределение ассимилятов 18
 — —, влияние заморозков 40
 — —, влияние засухи 39
 — — и минеральное питание 21, 22
 — — полуэмпирическое 21
 — — пространственное 18
 — — функциональное 19
 — — химическое 18
 Растение, густота стояния 36
 — рост 14
 Рис 126

- Ростовые матрицы 19
- — периода вегетативного роста 19, 55
- — репродуктивного роста 55

С

- Салат 25
- Сахарный тростник 27
- Свекла 21, 25
- Световая кривая фотосинтеза 48
- Сенокосы 126
- Сеяные травы 126
- Система атмосфера—почва 12
- источник—сток 21
- растение—почва 12
- Скорость роста 35
- Содержание углеводов 26
- Созревание 45, 46
- Сорго 23
- Состояние растений 118, 140
- Соя 23
- Сроки посадки 113
- Стебли 34
- Сумма температур активных 71
- — эффективных 71

Т

- Табак 21
- Темновая фиксация CO_2 38
- — —, коэффициенты 51
- — — и онтогенез 38
- — — и температура 38
- Температура воздуха 22, 26, 31, 33, 49
- листа 16
- максимальная 45
- минимальная 46
- оптимальная 49
- пороговая 49
- средняя дневная 31
- средняя декадная 121
- средняя ночная 46
- Томаты 50
- Транспирация 138
- Тростник сахарный 27

У

- Углеводы, их содержание 26
- , их параметры 19, 35
- , их фонды 19, 24
- Уравнение баланса биомассы 28, 29
- — водного 45
- Бергаланфи 14

- Давидсона и Филипа 14
- де Вита 18
- Иванова 14
- логистическое 28, 29
- Михаэлиса—Ментен 20
- МакКри 17
- Монси и Саэки 16
- перетока веществ из материнского клубня 36
- регрессии 136, 141
- роста 34
- — зерна 35
- — корней 39
- — надземной массы биомассы 39
- — площади ассимилирующей поверхности 35
- — функционирующей биомассы 34
- Росса 19
- темновой фиксации CO_2
- Торнли 18
- Удельная поверхностная плотность 67
- Урожайность биологическая 89
- , временной ряд 128
- , максимально возможная 137
- , потери 136
- среднеобластная 128
- , тенденция 128
- хозяйственная 127

Ф

- Фаза развития 58
- — — бутонизации 72
- возобновления вегетации 72
- восковой спелости 72
- всходов 72
- выметывания 72
- выхода в трубку 141
- колошения 72
- кущения 139
- молочной спелости 52
- налива зерна 140
- появления нижнего узла соломины 52
- увядания ботвы 72
- цветения 72
- Фасоль 65
- Фенологические прогнозы 116
- Фосфор 22
- Фотосинтез видимый 22
- и влажность почвы 16, 32, 51, 106
- и заморозки 40
- и концентрация CO_2 16
- и минеральное питание 23, 24
- , онтогенетическая кривая 32, 52
- и площадь листьев 22, 32
- и поражение инфекцией 42
- потенциальный 30, 51
- и радиация 16, 51, 106
- и световая кривая 30, 51

— и температура 16, 32, 51, 106
— и эвапотранспирация 23
Фотосинтетический потенциал 110, 114
Функции влияния влажности почвы на фотосинтез 31, 50
— — температуры воздуха на дыхание 33, 49
— — температуры воздуха на темновую фиксацию CO_2 38, 51
— — температуры воздуха на фотосинтез 31, 49
Функции автокорреляционные 129
— отмирания 35, 47
— пожелтения 35, 47
— ростовые 34, 55
— — периода вегетативного роста 57
— — репродуктивного роста 57

Х

Хлопчатник 21, 24

Ц

Цитрусовые 126

Ч

Чай 126
Число колосков в колосе 36
— зерен в колосе 36
— растений 36
Чистая продуктивность фотосинтеза 110, 113
Чувствительность модели 47, 89

Э

Эксперимент полевой 12, 57
— численный 105
Экосистема 14
Этапы органогенеза 58

Я

Ячмень яровой 22, 71, 100, 106, 109

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Часть I

ВЛИЯНИЕ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКУЮ ПРОДУКТИВНОСТЬ ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ УРОЖАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР	11
--	----

1.1. Подходы к математическому моделированию продукционного процесса	—
1.2. Моделирование процессов фотосинтеза и дыхания	15
1.3. Моделирование распределения ассимилятов	18
1.4. Длиннопериодные динамические модели продукционного процесса	21

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ УРОЖАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР	30
--	----

2.1. Моделирование основных физиолого-биохимических процессов — составляющих продукционного процесса растений	—
2.2. Моделирование влияния экстремальных погодных условий на основные процессы жизнедеятельности растений	38
2.3. Расчет характеристик радиационного и водно-теплового режимов посевов	44

Часть II

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ УРОЖАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИЙ ПРИРОСТА БИОМАССЫ	48
---	----

3.1. Параметры функций фотосинтеза и дыхания	—
3.2. Параметры, характеризующие онтогенетический аспект фотосинтеза и дыхания	52
3.3. Параметры формул для расчета характеристик радиационного и водно-теплового режимов посевов	54

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РОСТОВЫХ ФУНКЦИЙ	55
--	----

4.1. Функции периода вегетативного роста	57
4.2. Функции периода репродуктивного роста	63
4.3. Расчет площади ассимилирующей поверхности фотосинтезирующих органов	67
4.4. Определение численных значений параметров ростовых функций	70
4.5. Проверка ростовых функций	73

ГЛАВА 5. ПРОВЕРКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ	86
--	----

5.1. Проверка моделей	—
5.2. Исследование чувствительности моделей	89
5.3. Оценка географической изменчивости параметров моделей	97

Часть III

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ

ГЛАВА 6. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ПОСЕВОВ	105
---	-----

6.1. Влияние факторов среды на продуктивность посевов	105
6.2. Результаты моделирования фотосинтетической деятельности посевов озимых и яровых зерновых культур	109
6.3. Численные эксперименты с моделью продуктивности картофеля . .	113
ГЛАВА 7. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЕЙ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА	115
7.1. Основные принципы оценки	116
7.2. Методы оценки условий формирования урожая с использованием суточной агрометеорологической информации	118
7.3. Методы оценки условий произрастания сельскохозяйственных культур на основе декадной агрометеорологической информации	120
ГЛАВА 8. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ОСНОВНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР	125
8.1. Динамико-статистические методы прогнозирования урожайности . .	126
8.2. Статистические методы прогноза урожайности ранних яровых зерновых культур в Нечерноземье	137
8.3. Динамико-статистические методы прогноза урожайности применительно к конкретным почвенно-климатическим зонам	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	148
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	152
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	170

Анатолий Николаевич Полсвой

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Редактор Н. С. Смирнова. Художник Н. П. Гульковский. Художественный редактор В. В. Быков. Технический редактор В. И. Семенова. Корректор С. П. Доникина.

ИБ № 1479. Сдано в набор 20.01.88. Подписано в печать 21.06.83. М-38454. Формат 60×90^{1/16}. Бум. тип. № 1. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 11,0. Кр.-отт. 11,0. Уч.-изд. л. 12,78. Тираж 1730 экз. Индекс ПРЛ-29. Заказ 112. Цена 2 р. 30 к.
Гидрометеоиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, 23.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгения Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.