

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФГБОУ ВПО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

С.А. БОРОДИЙ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Учебное пособие

Допущено Учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по агрономическому образованию
в качестве учебного пособия для подготовки бакалавров
по направлению 110400.62 «Агрономия»
очной и заочной форм обучения

КОСТРОМА
КГСХА
2012

УДК 631.5.9; 578.69

ББК 40

Б 83

Автор: д.с.-х.н., профессор кафедры растениеводства, селекции, семеноводства и луговодства Костромской ГСХА *С.А. Бородий*.

Рецензенты: д.с.-х.н., профессор кафедры ботаники, физиологии растений и кормопроизводства Костромской ГСХА *В.С. Виноградова*; д.б.н., профессор кафедры лесоинженерного дела Костромского ГТУ *В.В. Шутов*.

Б 83 **Бородий, С.А.** Прогнозирование и мониторинг в растениеводстве : учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки 110400.62 «Агрономия» очной и заочной форм обучения. — Кострома : КГСХА, 2012. — 158 с.

ISBN 978-5-93222-237-9

В издании рассматриваются вопросы обоснования, разработки и настройки модели продукционного процесса культурных растений в агроэкосистемах.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки 110400.62 «Агрономия» очной и заочной форм обучения.

УДК 631.5.9; 578.69

ББК 40

ISBN 978-5-93222-237-9

© ФГБОУ ВПО Костромская ГСХА, 2012

© С.А. Бородий, 2012

© Оформление, РИО КГСХА, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Системное моделирование в сельскохозяйственном производстве	6
1.1. Уровни управления агроэкосистемами.....	6
1.2. Классификация моделей по уровню сложности	8
1.3. Представление объекта как системы	13
1.4. Принцип построения производственных функций.....	17
1.5. Уровни продуктивности сельскохозяйственных растений.....	19
2. Принципы построения компартментальных динамических моделей продуктивности экосистем	23
2.1. Факторы и процессы, действующие в открытых и замкнутых экосистемах	23
2.2. Требования и допуски к динамическим моделям.....	26
2.3. Построение компартментальных моделей	29
3. Радиационный режим экосистемы	34
3.1. Солнце как основной источник тепла и света для растения.....	34
3.2. Архитектоника растительного покрова.....	38
3.3. Малопараметрическая модель первого уровня продуктивности	40
4. Температурный режим агроэкосистем	53
4.1. Значение температуры почвы и воздуха для экосистемы.....	53
4.2. Поступление и распределение тепла в экосистеме.....	54
4.3. Теплоперенос в почве.....	56
4.4. Теплоперенос в посеве	64
4.5. Малопараметрическая модель действия температуры на урожайность сельскохозяйственных культур.....	67
5. Водный режим агроэкосистем	71
5.1. Значение влажности почвы и воздуха в экосистеме.....	71
5.2. Поступление и распределение влаги в экосистеме.....	73
5.3. Влагоперенос в почве	77
5.4. Влагоперенос в посеве	84
5.5. Малопараметрическая модель действия влаги на урожайность сельскохозяйственных культур.....	85

6. Прогноз биометрических параметров растений	88
6.1. Значение фотосинтеза в жизни растения.....	88
6.2. Газообмен листа и посева	91
6.3. Прогноз динамики биометрических параметров и управление ростом растения.....	93
6.4. Индекс фитоорганов компартмента.....	98
6.5. Динамика высоты стеблей и глубины корневой системы растений	99
6.6. Динамика количества растений на единице площади.....	102
7. Минеральное питание растений	106
7.1. Прогноз содержания органических и минеральных веществ в почве	109
7.2. Малопараметрическая модель минерального питания растений	112
7.3. Регулирование режима химического состава почвы.....	114
8. Основы системной экологии	118
8.1. Объект, метод и задачи системной экологии	118
8.2. Уровни агрегирования состава при изучении экосистем.....	120
8.3. Причины группировки особей в популяции	125
8.4. Пища как главный популяционно-динамический фактор	127
9. Моделирование экологических взаимодействий биоценоза	132
9.1. Динамика популяций.....	132
9.2. Межвидовые взаимодействия компонентов биоценоза	135
9.3. Модель прогноза и управления динамикой популяций	146
Список использованных источников	153
Приложение	154

ВВЕДЕНИЕ

Современное сельскохозяйственное производство — это сложная динамическая система, состоящая из многих взаимосвязанных компонентов. Осознать и учесть эти взаимодействия человеку, чаще всего, невозможно. А отсюда и невозможно принять действительно оптимальное решение. Не приняв оптимального решения, невозможно управлять производством. Выход из этого положения — разработка модели оптимизации управления процессом сельскохозяйственного производства, с учетом всего накопленного опыта и всех современных научных знаний, реализованной в компьютерных программах.

В условиях рыночной экономики планирование, мониторинг и прогнозирование в производстве являются главными факторами его эффективности.

Многочисленные взаимосвязанные факторы сельскохозяйственного производства часто зависят от климатических и погодных условий, которые в большей или меньшей степени учитываются при проведении экспериментов, направленных на совершенствование или разработку принципиально новых технологий производства продукции растениеводства. Механическое перенесение технологий или отдельных технологических операций в условия конкретного хозяйства может привести к негативным последствиям, несмотря на эффективность в других природно-климатических регионах.

Следовательно, если планируется внести изменения в установившуюся систему хозяйствования, рекомендуется предварительно просчитать ситуацию на модели и оценить эффективность. До недавнего времени в качестве модели выступало опытное поле хозяйства, где в течение нескольких лет проводились исследования того или иного приема. В результате тратились годы, делались большие затраты и хорошо, если получался положительный результат. Компьютерные модели позволяют провести те же испытания с минимальными затратами, в очень короткие сроки и по различным сценариям. Кроме того, некоторые эксперименты могут быть опасны для окружающей среды. Для них применимы только виртуальные модели.

1. СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

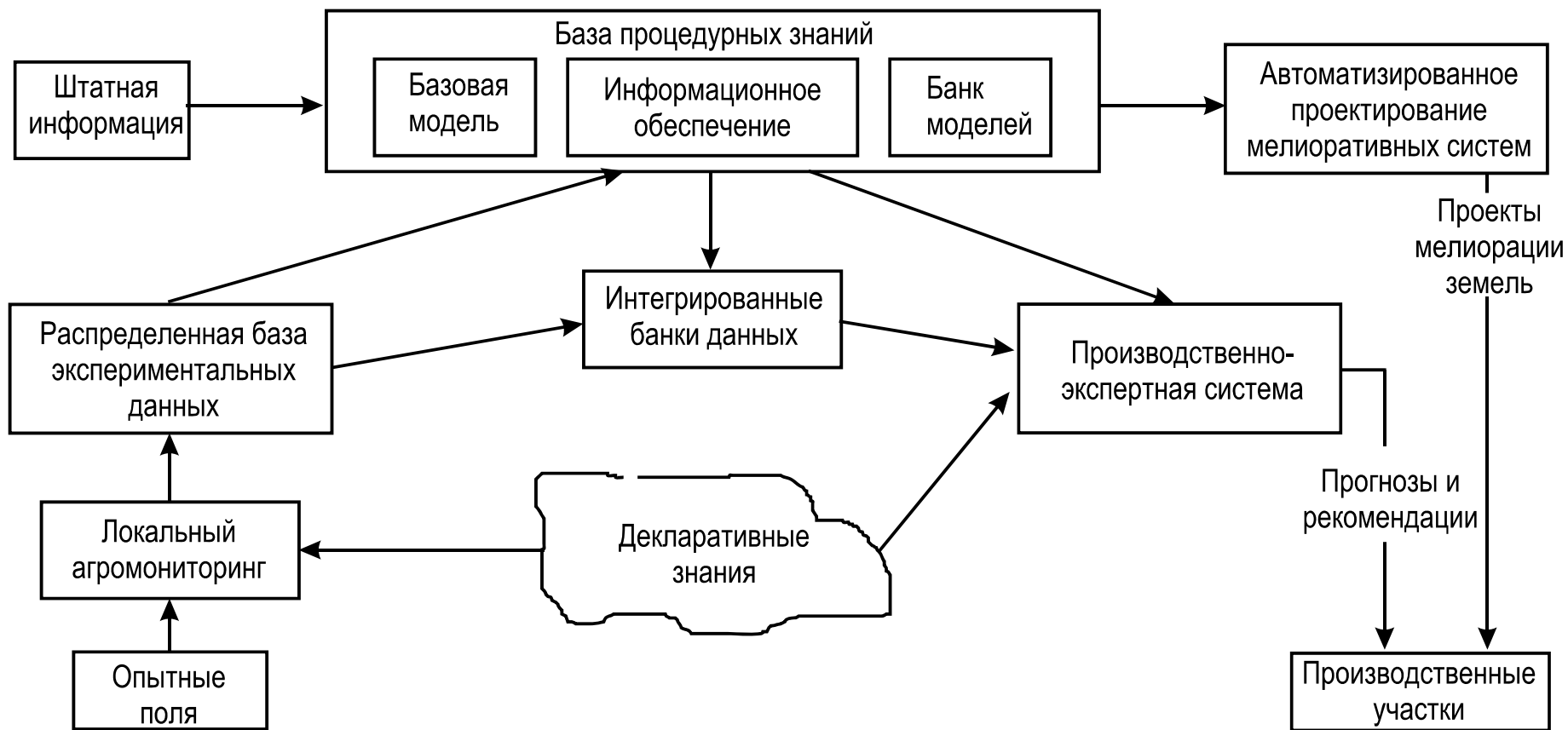
1.1. Уровни управления агроэкосистемами

Основу моделирования продукционного процесса заложил академик И.С. Шатилов, называя его «программирование урожаев». Он изложил 10 принципов программирования, основывавшихся на главных законах земледелия. В настоящее время эти принципы в несколько измененном виде вошли в теорию продукционного процесса сельскохозяйственных растений. Эта теория связывает все полученные знания в единую систему сложных процессов взаимодействия культурных растений с сорными, с болезнетворными организмами, с вредителями и болезнями, с динамикой биоценологических процессов в почве, с переносом вещества и энергии, с физико-химическими трансформациями минеральных и органических соединений. В производстве постоянно требуются прогнозы и рекомендации, которые обеспечивает специальная консультационная служба, занимающаяся разработкой научного обеспечения производственного процесса.

Таким образом, по степени использования накопленных наукой и практикой знаний можно выделить несколько уровней принятия решений по управлению сельскохозяйственным производством (рис. 1).

В схему включаются следующие основные элементы:

- 1) *полевой опыт* как источник новых экспериментальных данных о процессах, происходящих в агроэкосистемах;
- 2) *локальный агромониторинг* — система сбора, первичной обработки и хранения экспериментальных материалов;
- 3) *базовая модель* агроэкосистемы, рассматриваемая наряду с системой ее *информационного обеспечения* и *банком прикладных моделей* как *база процедурных знаний* в растениеводстве и мелиорации;
- 4) *интегрированные банки данных*, обеспечивающие информационную поддержку автоматизированных систем производственного назначения;
- 5) знания агрономов-экспертов, образующие *декларативную базу знаний*;
- 6) *автоматизированная система поддержки проектных решений*, связанных с проектированием мелиоративных систем, разработкой рациональных систем земледелия и других долгосрочных фондоемких программ;



*Рис. 1. Схема поддержки при управлении агросистемами
(по Р.А. Полуэктову, 1991)*

7) *производственно-экспертные системы*, реализуемые в виде компьютерных программ и образующие в совокупности гибкие автоматизированные системы управления оперативными технологическими процессами в земледелии и растениеводстве.

Так замыкается цепь подготовки и принятия решений от получения новой информации в полевом опыте до выработки практических рекомендаций.

Получается трехуровневая система принятия решений.

- *Уровень декларативных знаний*, который включает знания, полученные из лекционных и практических занятий, общения со специалистами и др.

- *Уровень простых (или малопараметрических) моделей*, которые используются в настоящее время в практической работе. Малопараметрическими они называются потому, что для их работы требуется сравнительно немного входной информации.

- *Уровень базовых моделей* — самый высший уровень, модели которого основываются на физико-химических законах природы. Это уровень фундаментальных исследований. Они требуют ввода информации, которая является причиной всех процессов, происходящих в агроэкосистеме.

1.2. Классификация моделей по уровню сложности

Модель — это все, что похоже на данный предмет, выполняет основные его функции, но им не является. Основное требование, предъявляемое к модели: анализ и работа с ней должны быть полезны при последующем обращении к самому моделируемому предмету или явлению. По способности к реализации модели можно разделить на физические и виртуальные. Типичный пример физической модели — модель самолета, которая испытывается в аэродинамической трубе. В данном случае подразумевается, что поведение модели будет аналогично поведению рабочего образца самолета. Модель экологической системы нельзя представить как физическое тело, поэтому она описывается логическими или математическими выражениями и, следовательно, является виртуальной.

В настоящее время разработано достаточно большое количество моделей, связанных с производством, хранением и переработкой продукции растениеводства, которые по уровню сложности можно классифицировать следующим образом [2].

Вербальные модели, описывающие какой-либо процесс словами. Расчеты по такой модели не проводятся, так как отсутствуют числовые параметры, но она позволяет сформулировать задачи для дальнейших исследований. Например: «При внесении избыточных доз азотных удобрений возможно полегание посевов зерновых, усиление вредоносности группы сосущих вредителей, удлинение периода вегетации культуры и накопление нитратов и нитритов в продукции выше ПДК».

Табличная и графическая информация (рис. 2) — это уровень моделирования, отражающий в таблицах, графиках, диаграммах, номограммах результаты эксперимента.

Урожайность соломы льна в зависимости от осадков

Доза удобрений, ц/га	Осадки, мм			
	60	80	100	120
0	25	30	35	40
2	31	36	41	46
4	37	42	47	52
6	43	48	53	58

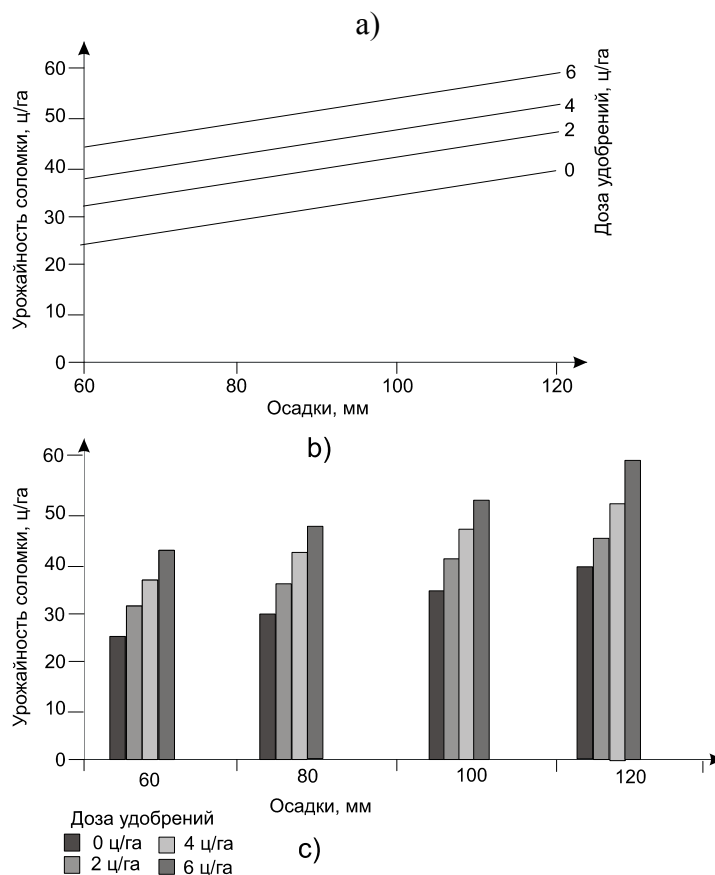


Рис. 2. Представление информации в виде: таблицы (а), линейного графика (б) и столбчатой диаграммы (в) (по Б.А. Доспехову)

Достоинства этого уровня — простота и наглядность, недостатки — полная невозможность прогнозирования численного значения зависимого параметра при изменении независимого на величину, не изучавшуюся в эксперименте, отсутствие гарантии получения аналогичного результата в других условиях, а также невозможность обоснованного заключения при экстраполяции изучаемого фактора. Например, если в эксперименте на опытном поле мы получили прибавку урожая 0,2 т/га, это совсем не значит, что такую же прибавку мы получим на поле хозяйства или же на следующий год.

Регрессионные модели (рис. 3) являются уже более высоким уровнем моделирования и служат не только для отражения результатов эксперимента, но и для прогнозирования поведения системы при промежуточных градациях независимого фактора.

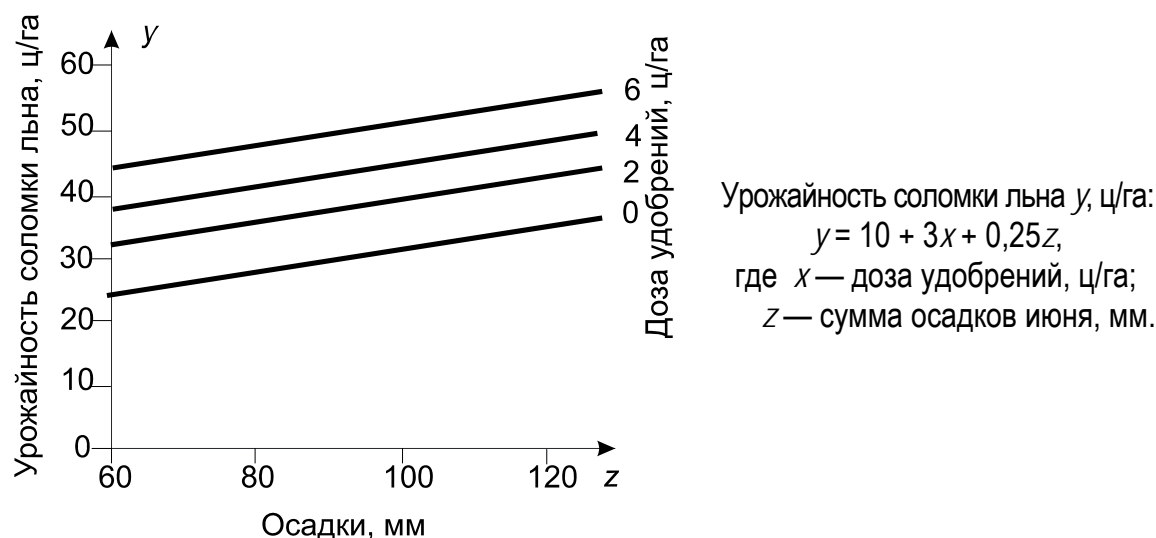


Рис. 3. Пример многофакторной регрессионной модели (по Б.А. Доспехову)

Этот тип моделей определяет количественную или качественную связь изучаемого параметра с влияющими на него факторами. Однако такие «жесткие» модели тоже не позволяют делать экстраполяцию за интервал градации независимого фактора, в пределах которого рассчитана модель. Например, если изучена зависимость урожайности от нормы высева, варьирующей от 3 до 5 млн всхожих семян на гектар и по этим данным создана модель, то вероятность удовлетворительного расчета при введении нормы высева менее 3 и более 5 млн/га очень невелика, так как можно выйти за зону оптимума, как это показано на рисунке 4.

Базовые модели. В основу при их разработке положено *математическое описание теоретических представлений о механизмах, происходящих в природе процессов.*

Пример расчета блока теплоемкости почвы в базовой динамической модели (по Р.А. Полуэктову):

$$C = C_S P_S + C_W W,$$

где C — теплоемкость почвы, кал/см³·К;

C_S — теплоемкость почвенного скелета, кал/см³·К (меняется в зависимости от механического состава почвы);

P_S — плотность почвы, г/см³ (меняется в зависимости от обработки почвы и времени);

C_W — теплоемкость почвенного раствора, кал/см³·К.

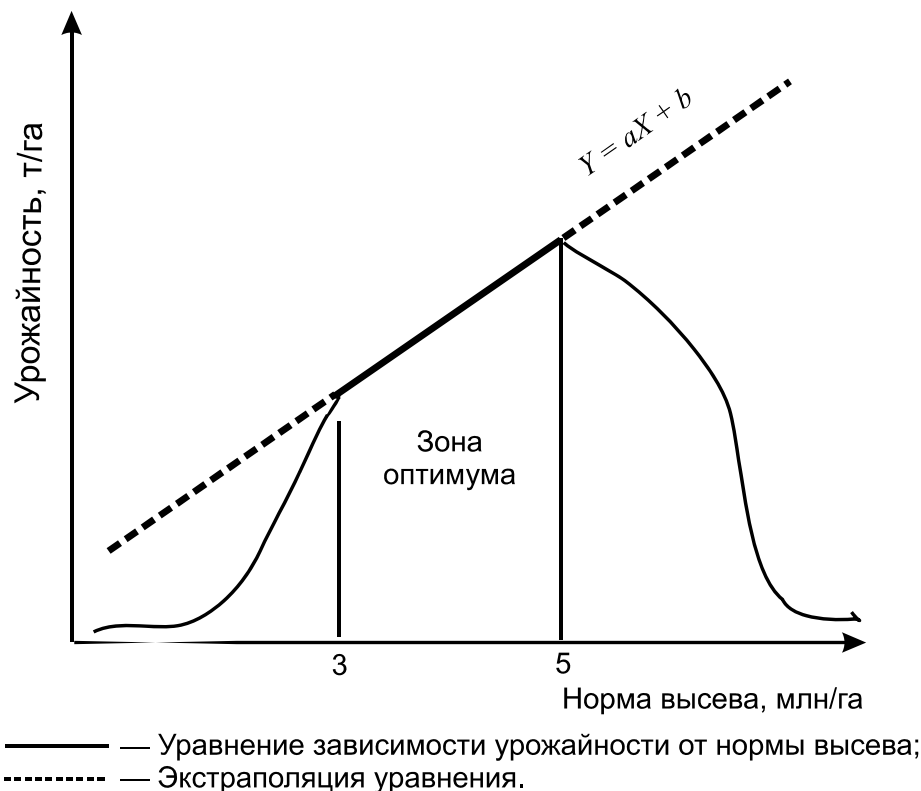


Рис. 4. Выход за зону оптимума линейного графика, приводящий к погрешностям работы регрессионной модели

Такие модели, как правило, динамические, что является огромным преимуществом, так как дает возможность изучить то или иное воздействие на экосистему через изменение заданного параметра в заданный интервал времени. Другое достоинство — возможность вставки дополнительных модулей или конкретизация существующих по мере совершенствования знаний и поступления новой информации. Недостатком является сложность разработки и практического применения

базовой модели. Сложность разработки объясняется необходимостью больших затрат высококвалифицированного труда, а сложность использования — большим количеством входных параметров, получить которые в производственных условиях не всегда возможно. Например, уравнение, описывающее динамику потребления азота и накопление биомассы растением, позволяет изучить, как изменится количество биомассы, если будет сделана подкормка N_{30} в фазу кущения.

В сельскохозяйственном производстве, где достаточно точности расчетов 80...85% [4], распространены производственные модели, основанные на многофакторных регрессионно-динамических функциях, полученных при статистической обработке многофакторных экспериментов. Эти модели просты в реализации, но диапазон и количество входных параметров невозможно увеличить без дополнительных экспериментов, включающих предыдущие параметры, плюс вновь вводимые.

Интенсивная разработка моделей полевых культур в мировой практике началась примерно с 1975 года. Активнее этот процесс шел в США, Японии, странах Западной Европы и некоторых других, что, впрочем, не говорит об отставании нашей отечественной науки от зарубежной. Дело в том, что для работы моделей продукционного процесса растений, не говоря уже о моделях, описывающих экосистему, требуются быстродействующие вычислительные машины, которые в вышеупомянутых странах стали доступны широкому кругу пользователей на 15...20 лет раньше, чем в России. Вторая причина заключалась в большей доступности для западных ученых информации через сеть Internet.

Итак, вербальные модели не позволяют сделать расчет, табличная и графическая информация только констатирует факт, не позволяя делать расчеты и прогнозы, многофакторные регрессионные модели могут делать расчет, но слишком «жестко» привязаны к конкретным условиям, базовые динамические модели хотя и «гибкие», но сложны в разработке и производственном использовании. Где же выход? Выход, может, и не идеальный, но вполне приемлемый, был найден А.С. Образцовым [4] в форме *производственных функций*, основанных на *системном методе*.

Но прежде чем говорить о производственных функциях и системном методе, надо выяснить, что такое система и системный метод.

1.3. Представление объекта как системы

Система — это любая целостная совокупность элементов, находящихся во взаимодействии, объединенная в единое целое и способная выполнять заданную функцию. Следовательно, любая система характеризуется составом, структурой и функцией.

Например, если рассматривать сельскохозяйственное предприятие как систему, то в ней можно выделить следующие составляющие ее единицы (состав) (рис. 5):

- *руководитель* как фактор, координирующий и направляющий работу всей системы;
- *коммерческая служба*, отвечающая за закупки и реализацию;
- *экономическая служба*, ведающая вопросами эффективности производства и взаиморасчетами;

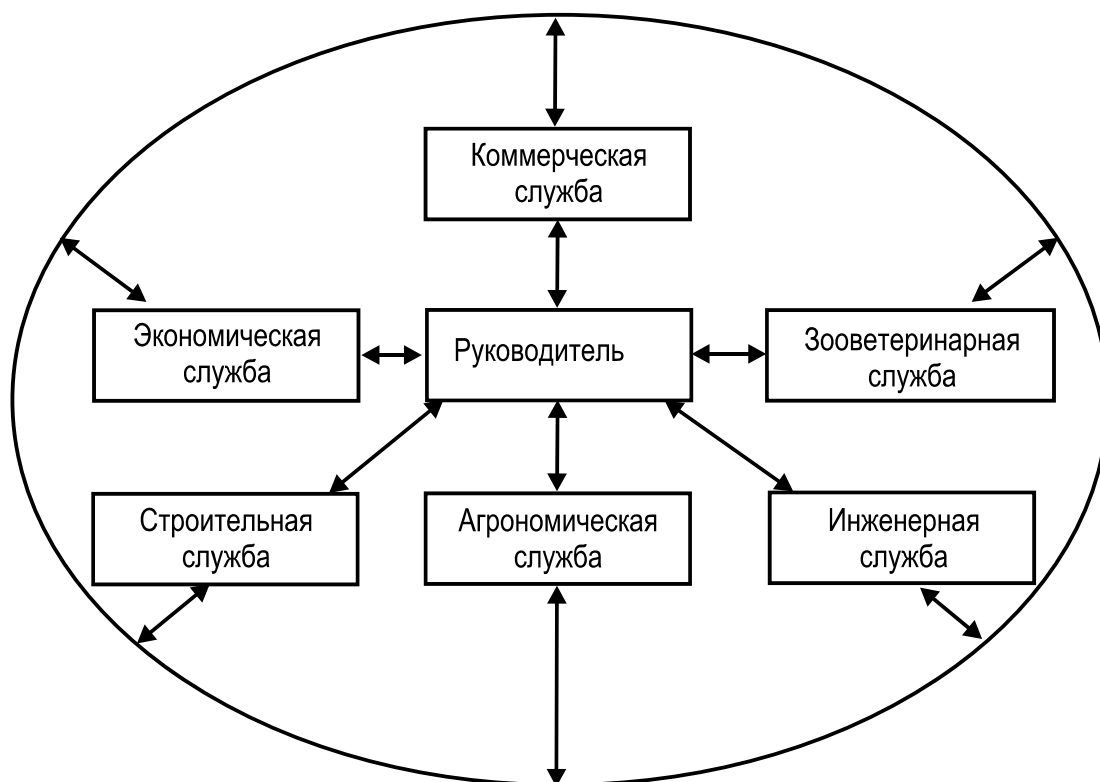


Рис. 5. Структурная схема системы управления сельскохозяйственным предприятием

- *зооветеринарная служба*, обеспечивающая производство продукции животноводства;
- *инженерная служба*, которая следит за обеспеченностью и работоспособностью механического и электрического оборудования;
- *строительная служба*, занимающаяся вопросами строительства жилья и производственных помещений.

Все перечисленные компоненты взаимодействуют с той или иной силой зависимости между собой по принципу *обратной связи*, то есть изменение одного из компонентов ведет за собой изменение других, и наоборот. Эти связи образуют *структуру* системы.

Для примера рассмотрим структурные связи агрономической службы (рис. 6).

Агрономическая служба – руководитель. Руководитель хозяйства обеспечивает общую направленность работы службы, например, производство семян рапса для получения масла. Агрономическая служба, в свою очередь, рассчитывает необходимую для этого проектную документацию и представляет ее на рассмотрение руководителя.

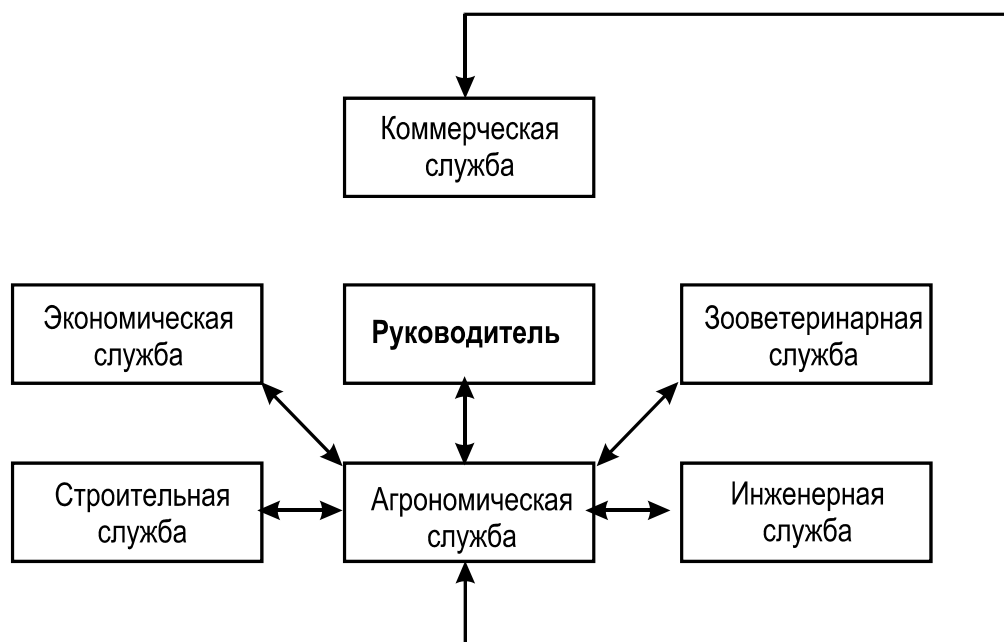


Рис. 6. Структурные связи блока агрономической службы системы управления сельскохозяйственным предприятием

Агрономическая служба – экономическая служба. Технологическая документация передается экономической службе для экспертизы на рентабельность, а та возвращает заключение на принятие к исполнению или корректировку.

Агрономическая служба – инженерная служба. Если экономисты считают целесообразным и выгодным производить семена рапса, то агрономическая служба передает сведения о необходимом техническом обеспечении производства инженерной службе, которая производит закупку или, при отсутствии заказанной марки машины, дополнительно согласует с агрономами замену ее на аналог.

Агрономическая служба – строительная служба. Первая дает заявку второй на строительство новых или реорганизацию существующих производственных помещений, а строители, в свою очередь, выполняют работы или согласуют с агрономами возможные варианты помещений при невозможности полного удовлетворения заявки.

Агрономическая служба – зооветеринарная служба. Агрономическая служба дает зооветеринарной сведения по объемам побочной продукции, которую планируется использовать в животноводстве и получает заключение о возможности использования.

Агрономическая служба – коммерческая служба. Полученные семена рапса, о валовом сборе которых сообщает агрономическая служба, надо реализовать. Этим и занимается коммерческая служба, которая, в свою очередь, заключает контракты на объем заказа перерабатывающих предприятий и сообщает о состоянии на рынке агрономической службе.

Вот таким образом работает система обратной связи. По остальным блокам схемы можно проследить аналогичные связи, которые всё же не обеспечат эффективную работу любого компонента системы, если не будет закона, по которому работает данная система и который в системном моделировании называется *функцией* системы.

Этот закон должен описывать всю структуру системы и быть способным прогнозировать, как изменится работа (функционирование) всей системы, если изменится количество или качество компонентов. В нашем примере инженерная служба может не обеспечить технологию некоторыми необходимыми машинами или заменить их аналогами. Используя имеющуюся модель, агрономическая служба рассчитает, как изменится объем производства семян и работа всех остальных вспомогательных служб, сообщит результаты руководителю, который будет принимать принципиальное решение о целесообразности производства семян рапса на предприятии или совместно со службами ищет выход из создавшегося положения. Иными словами, модель, описывающая сельскохозяйственное производство, должна искать оптимальное решение.

Поиск и реализация в компьютерном варианте закона функционирования системы является *задачей системного моделирования*.

Любая система характеризуется рядом системных принципов, которые следует учитывать при ее логическом анализе.

Принцип взаимозависимости системы и внешней среды. Система формирует и проявляет свои свойства в процессе взаимодействия с внешней средой, являясь при этом ведущим, активным компонентом. Если взять наше гипотетическое предприятие, то на него воздействует в первую очередь экономическая обстановка: нет спроса на семена рапса — система функционирует в направлении снижения производства, а это поведет за собой повышение спроса, которое, в свою очередь, вызовет повышение производства и т.д.

Принцип целостности. Свойства всей системы нельзя сводить к свойствам суммы отдельных ее элементов, поскольку срабатывает «эффект системы», где 2×2 не равно 4.

Принцип структурности заключается в возможности описания системы через описание отдельных связей и соотношений входящих в нее элементов. Это служит основой так называемого *структурного моделирования*, когда описывается формулами не сразу вся система, как при множественном регрессионном анализе, а берутся вначале два компонента и связываются между собой, затем берутся следующие два и также связываются между собой и т.д. В дальнейшем одна взаимосвязанная пара связывается с другой, как это показано на рисунке 7.

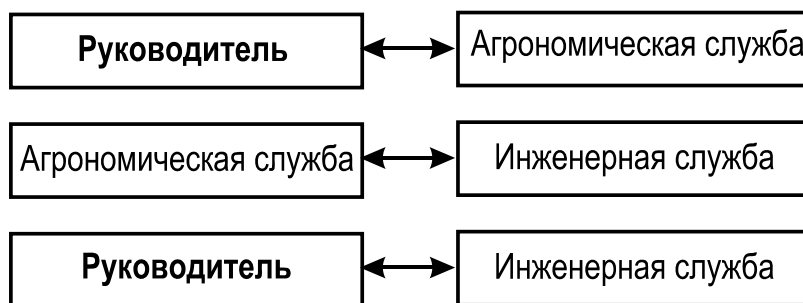


Рис. 7. Схематическая реализация принципа структурного моделирования

Принцип иерархичности. Каждый компонент системы можно представить как систему более низкого уровня. Например, агрономическую службу как компонент системы сельскохозяйственного производства можно представить как систему более низкого уровня организации (рис. 8).

Принцип множественности описания системы. В связи с принципиальной сложностью системы ее адекватное описание требует построения множества различных моделей, каждая из которых описывает определенный аспект.

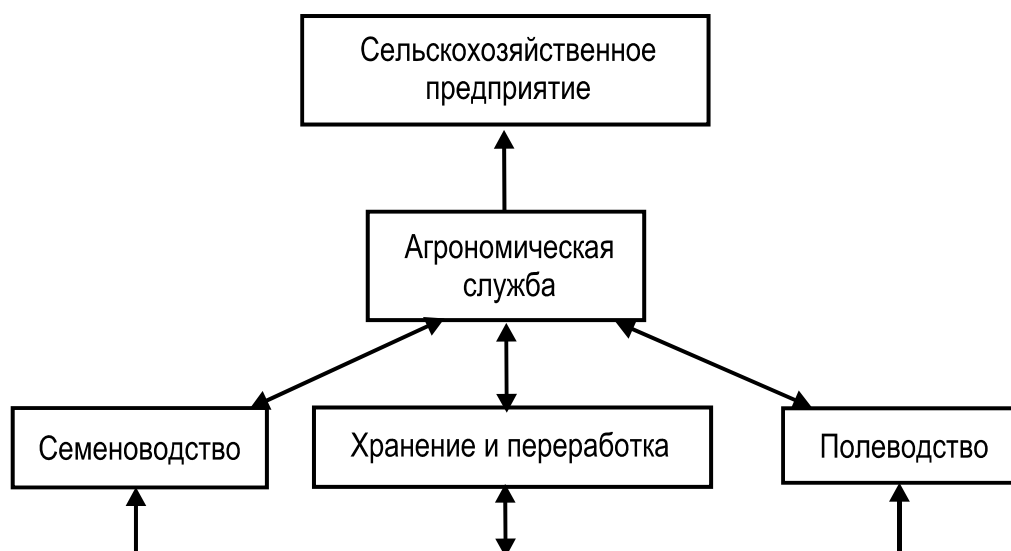


Рис. 8. Схематическая реализация принципа иерархичности

Все эти принципы и являются преимуществами структурного системного моделирования, в основе которого лежит описание вначале отдельных модулей общей модели, а затем связь этих модулей между собой, как представлено на схеме (рис. 9).

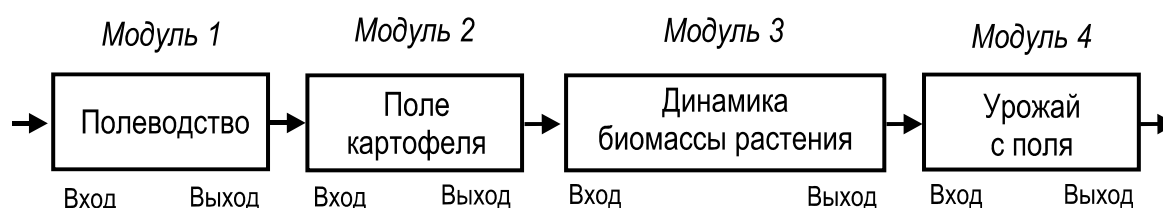


Рис. 9. Схема связи модулей модели производственного процесса картофеля

Каждый модуль по мере накопления новых знаний может быть детализирован, то есть разбит на более мелкие, связанные между собой, модули и т.д.

1.4. Принцип построения производственных функций

Теперь вернемся к производственным функциям и методике их разработки. Прежде чем говорить о высокой или низкой урожайности, надо найти объективный критерий для сравнения. Этот критерий называется *потенциальная урожайность* (ПУ). Потенциальная урожайность определяется количеством поступающей на данной географической широте фотосинтетически активной радиации, которая принимает непосредственное участие в фотосинтезе, то есть процессе накопления биомассы.

Но почему же мы не получаем того урожая, который могли бы? А вот здесь пора вспомнить законы оптимума, незаменимости факторов, лимитирующего фактора и др. Если значение фактора выходит за зону оптимума, он становится лимитирующим, определяет уровень урожайности и заменить этот фактор другим нельзя (рис. 10). Таким образом, повышение урожайности — это приведение всех факторов формирования урожая в зону оптимума.

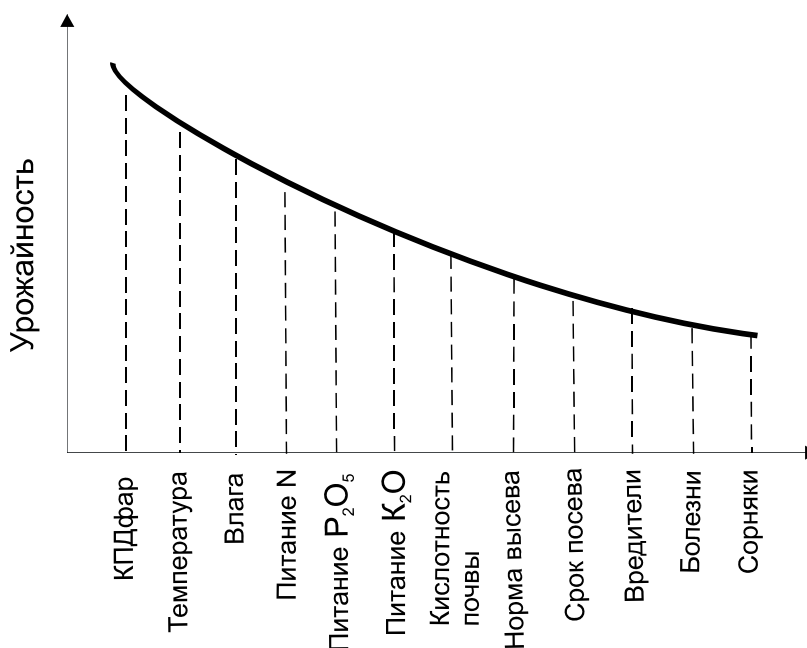


Рис. 10. Зависимость снижения уровня урожайности от неоптимальности обеспеченности факторами (по И.А. Матаруевой)

Производственная функция как раз и учитывает, насколько фактическая обеспеченность тем или иным фактором соответствует оптимальной и насколько снизится урожайность в случае значительного несоответствия. В общем виде производственная функция записывается следующим образом:

$$U = Uq \text{КПДфар} \prod_{i=1}^n K_i,$$

где U — расчетная урожайность сельскохозяйственной культуры, т/га;

Uq — потенциальная урожайность культуры, т/га;

КПДфар — коэффициент полезного действия ФАР;

$\prod_{i=1}^n$ — знак произведения;

K_i — функция оптимальности i -го фактора.

Каждая функция оптимальности рассчитывается отдельно по каждому фактору с помощью малопараметрических регрессионных моделей, которые в общем виде представляют собой соотношение

$$K_i = \frac{F_{i \text{ факт}}}{F_{i \text{ оптим}}},$$

где $F_{i \text{ факт}}$ — фактическая обеспеченность i -м фактором;

$F_{i \text{ оптим}}$ — оптимальная потребность растения в i -м факторе.

Хотя производственная функция и использует регрессионные уравнения, но построена она по типу *мультипликативных функций*, которые позволяют изучать каждый фактор в отдельности, а потом при помощи значения функции оптимальности K_i добавлять новые факторы к созданной ранее производственной функции. Конечно, остальные недостатки регрессионных моделей не исключаются, но лучшего варианта для широкомасштабного производственного использования пока нет.

1.5. Уровни продуктивности сельскохозяйственных растений

В настоящее время моделирование продукционного процесса — развивающееся направление растениеводства, где еще многое надо изучать, поэтому пока выделены только четыре уровня производства биомассы, чтоб в дальнейшем обеспечить возможность совершенствования модели по принципу структурности.

• *Первый уровень продуктивности.* Рост и развитие растений происходят в условиях богатого минерального питания и достаточного водообеспечения в течение всего периода вегетации. Скорость прироста биомассы определяется погодными условиями и составляет при сомкнутом растительном покрове 150...350 кг/га в день. Основной лимитирующий фактор — поглощенная радиация, но она может быть ограничена низкой температурой воздуха. Этот уровень соответствует *потенциальному урожаю*.

Таким образом, первый уровень продуктивности характеризуется урожайностью, полученной при лимитирующем действии фотосинтетически активной радиации и температуры воздуха (рис. 11).

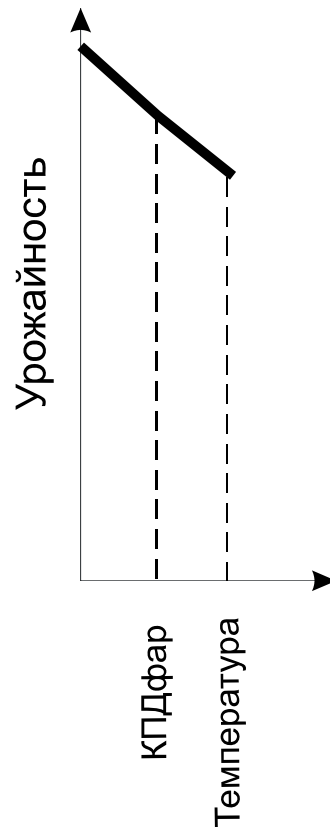


Рис. 11. Факторы, определяющие первый уровень продуктивности

- *Второй уровень продуктивности.* Рост растений лимитируется почвенной влагой в течение большей части вегетационного периода, а в те периоды, когда влаги достаточно, скорость прироста биомассы возрастает до максимальной величины, определяемой погодными условиями. Это поля с высоким агрофоном, интенсивно удобряемые, но не орошаемые.

Таким образом, второй уровень продуктивности характеризуется урожайностью, полученной при лимитирующем действии фотосинтетически активной радиации, температуры воздуха и влаги (рис. 12).

- *Третий уровень продуктивности.* На протяжении большей части вегетационного периода рост растений лимитируется запасами азота в почве, а в остальное время сезона — погодными условиями и условиями увлажнения.

Таким образом, третий уровень продуктивности характеризуется урожайностью, полученной при лимитирующем действии фотосинтетически активной радиации, температуры воздуха, влаги и азотного питания (рис. 13).

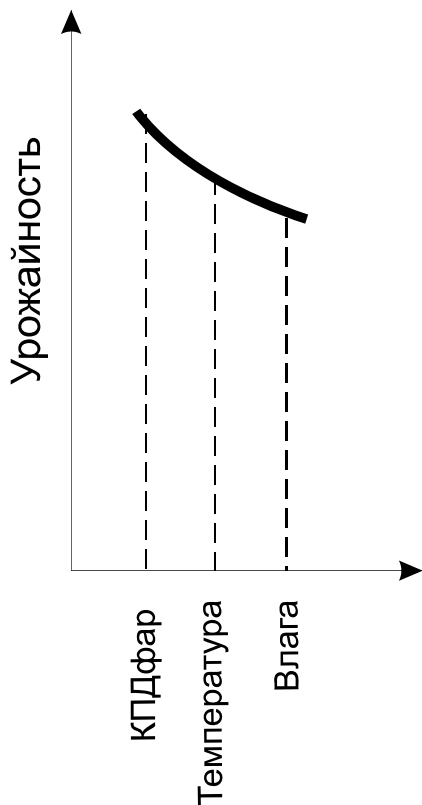


Рис. 12. Факторы, определяющие второй уровень продуктивности

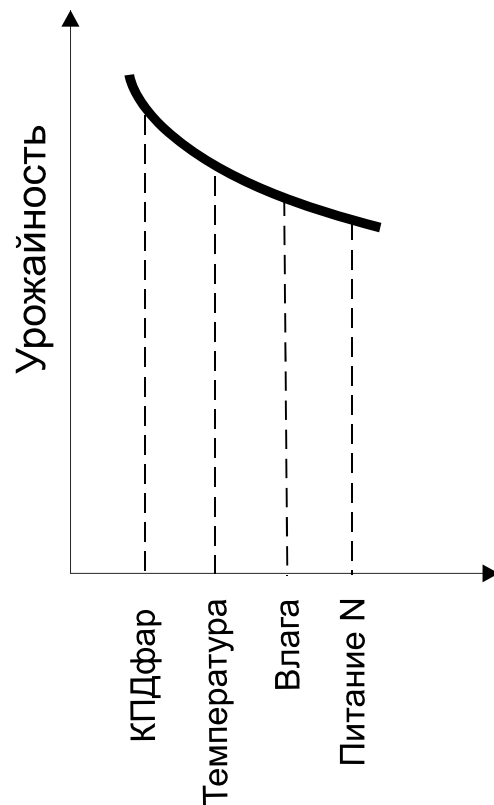


Рис. 13. Факторы, определяющие третий уровень продуктивности

- *Четвертый уровень продуктивности* (см. рис. 10). Лимитирование роста растений осуществляется низким содержанием подвижного фосфора и других элементов на протяжении большей части сезона вегетации, а лимитирование азотом, доступной влагой и погодными условиями — в оставшееся время сезона. Типичная скорость прироста сухой биомассы 10...15 кг/га в день в течение сезона вегетации, продолжающегося 100 или менее дней. Такая ситуация встречается при недостатке удобрений и при производстве экологически чистой продукции.

Таким образом, четвертый уровень продуктивности характеризуется урожайностью, полученной при лимитирующем действии фотосинтетически активной радиации, температуры воздуха, влаги, азотного, фосфорного, других видов питания, вредоносных объектов и производственных условий.

Контрольные вопросы

1. На каких уровнях можно управлять агроэкологическими системами?
2. Как классифицируются модели по уровню сложности?
3. Что такое системное моделирование и как представить объект как систему?
4. По какому принципу построена модель производственной функции в растениеводстве?
5. Какими факторами определяются уровни продуктивности сельскохозяйственных растений?

2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОМПАРТМЕНТАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ЭКОСИСТЕМ

Экологическая система (экосистема) — это многокомпонентная многоструктурная единица биосферы Земли, в которой происходит накопление и трансформация вещества и энергии. Процессы, происходящие в агроэкологических системах (агроэкосистемах), усложнены действием антропогенного фактора. Все многообразные процессы, проходящие в экосистеме, действуют одновременно в пространстве и времени по принципу обратной связи. Кроме того, скорость протекания процессов и численные значения факторов изменяются по мере удаления от поверхности почвы. Все это делает построение модели весьма сложной и трудоемкой процедурой, которая вынуждает применять некоторое упрощение реальных процессов, если это упрощение не приводит к существенному расхождению между реальным и расчетным результатом.

2.1. Факторы и процессы, действующие в открытых и замкнутых экосистемах

При разработке модели продуктивности агроэкосистемы биотические и биоценотические связи значительно упрощаются: заменяются константами или совсем не учитываются. В результате все процессы, действующие на продуктивность, можно объединить в отдельные модули, связи между факторами которых гораздо слабее, чем внутри каждого из них. Тогда агроэкосистема может быть представлена следующей схемой, состоящей из отдельных модулей, которые в дальнейшем будут рассматриваться как системы более низкого уровня организации (рис. 14).

Поскольку ни один организм не живет изолированно от других, постольку любая экосистема не может быть замкнута на саму себя.

- *Открытая экосистема* характеризуется наличием внешних (экзогенных) связей с окружающей средой.

- *Замкнутая экосистема* изолирована от возмущающего воздействия окружающей среды.

Таким образом, рассматриваемая здесь агроэкосистема также является открытой.

Но если не существует замкнутых систем, почему используется это понятие? Дело в том, что разработать модель замкнутой системы, где действуют только *внутренние* (эндогенные) факторы, на-

много проще, чем модель открытой системы, в которой надо учитывать не только *внутренние*, но и *внешние* факторы. Когда разработана модель замкнутой экосистемы, можно связать ее с другими экосистемами, сделав, таким образом, открытой.

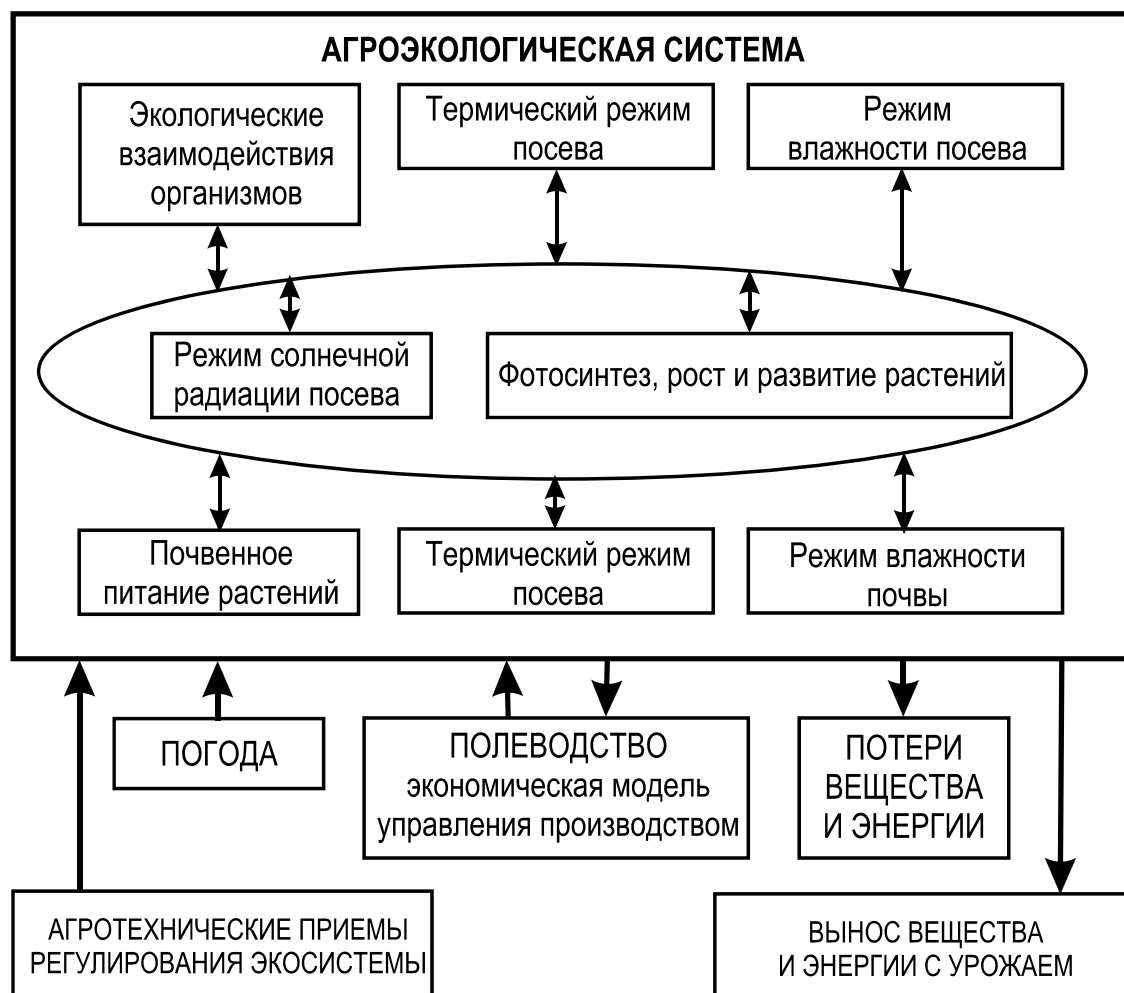


Рис. 14. Схема структурных связей агроэкосистемы
(по Р.А. Полуэктову (1991)
с модификацией С.А. Бородия (2010))

Если рассматривать агроэкосистему как открытую (каковой она и является), в нее должно что-то вводиться и что-то выводиться. Внутри же происходят разнообразные трансформации вещества и энергии. Для начала представим агроэкосистему как «черный ящик», то есть изучим, что подается на вход и что получается на выходе.

Итак, на вход агроэкосистемы подаются количественные значения факторов, которые можно подразделить на две группы: регулируемые и нерегулируемые. *Регулируемые* — это агротехнические приемы, которые изменяются количественно и качественно по заданному сценарию. *Нерегулируемые* (или регулируемые в малой

степени и косвенно) — погодные условия (осадки, температура воздуха, скорость ветра, содержание углекислого газа, интенсивность и продолжительность солнечного сияния, облачность), миграции организмов и другие внешние существенные факторы.

На выходе снимаются потери того или иного фактора, которые тоже можно разделить на две группы: продуктивные и непродуктивные. *Продуктивными* являются вынос элементов питания и биомассы с урожаем. К *непродуктивным* относятся отражение солнечной радиации, тепловое излучение почвы и растений, сток, испарение почвой и просачивание в грунтовые воды поступающей в почву влаги, вымывание в грунтовые воды, переход в недоступную для растений форму элементов питания и др.

Поэтому, когда мы изучаем действие агротехнического приема на урожайность культуры и только этим и ограничиваемся, мы находимся на уровне вербальных или табличных моделей. Иными словами, только тестируем этот черный ящик, выясняя: а что ты можешь? Конечно, в определенных рамках эти модели работают, но не дают ответа на вопрос, почему так, а не иначе?

Внутри агроэкосистемы происходит множество разнообразных взаимозависимых процессов, самыми существенными из которых являются радиационный режим посева, тепловой и водный режимы почвы и атмосферы внутри посева, процессы фотосинтеза, роста и развития растений, экологические взаимодействия организмов, динамика элементов питания (в которую входят и органические, и минеральные вещества). Все эти процессы взаимозависимы и происходят практически одновременно, что значительно затрудняет моделирование.

Рассмотрим это на примере. За начало возьмем радиационный режим посева как самый главный фактор, определяющий функционирование агроэкосистемы, обеспечивающий первичную энергию (световую и тепловую). От уровня освещенности внутри посева зависит интенсивность фотосинтеза, которая через скорость накопления биомассы оказывает обратное влияние на освещенность листьев разных ярусов, так как чем больше площадь листьев, тем сильнее они затеняют друг друга. В свою очередь, рост и развитие растений зависят от водного режима почвы и атмосферы внутри посева. Вода обеспечивает многие физиологические процессы растения, но, в свою очередь, сам водный режим связан и зависит от количества биомассы, транспирирующей воду. На саму транспирацию, а также на испарение влаги из почвы оказывают действие температура почвы, атмосферы и листьев. Обычно с повышением температуры воз-

растает испарение, но испарение как энергоемкий процесс вызывает понижение температуры. Экологические взаимодействия организмов обусловлены многими факторами, среди которых главное место занимает трофический (пищевой). Например, динамика почвенных элементов минерального питания вызывает неравномерность поступления их в растения, которые снижают накопление биомассы при недостатке питания в критические периоды. В свою очередь, интенсивное развитие биомассы растения влечет за собой уменьшение содержания элементов питания в почве. Трофический фактор для животных организмов тоже функционирует по принципу обратной связи. Так, если биомасса растений снижается, снижается и количество фитофагов, а затем и зоофагов. Если же снизится количество фитофагов, биомасса растений возрастет (при условии, что ростовые процессы еще продолжаются).

При желании можно продолжить анализ и выявить различные разветвления рассмотренной нами цепочки, но и из этого примера становится ясно, что агроэкосистема — это сложное динамическое образование, функционирующее по принципу обратной связи.

Естественно, для ответа на вопрос: «что произойдет, если...?» табличного уровня моделирования уже недостаточно. Здесь мы должны перейти на уровень регрессионных моделей, определяющих, насколько изменится количество одного фактора при изменении определенного количества одного или нескольких других.

2.2. Требования и допуски к динамическим моделям

Конечный урожай представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов, протекающих в почве, приземном слое воздуха и в самих растениях во времени. Причем динамика во времени имеет дискретно-непрерывный характер. Так, если температура воздуха и почвы изменяется непрерывно, то осадки или фазы развития дискретны, так как первые выпадают случайно и довольно непродолжительны, а вторые сменяют друг друга довольно резким скачком через более или менее продолжительный промежуток времени.

Модель должна носить балансовый характер, то есть в экосистеме рассчитывается баланс поступления и потребления того или иного фактора (в том числе передвижение вещества и энергии). *В ненарушенных системах расход вещества равен приходу*, так как произведенное органическое вещество практически полностью остается на месте в виде растительных и животных остатков, а незначительное отчуждаемое количество компенсируется приходом извне.

В агроэкосистемах баланс вещества нарушен из-за ежегодного отчуждения значительной доли микро- и макроэлементов с произведенной биомассой. Разумеется, естественные процессы восполнения не могут компенсировать такое количество отторгнутого вещества, что и обуславливает необходимость искусственного введения в агроэкосистему органических и минеральных веществ в виде удобрений.

В настоящее время проблема компенсации вещества и энергии в агроэкосистемах достаточно полно разработана для практического использования, хотя и далека от совершенства из-за большого количества различного рода коэффициентов, найденных эмпирическим путем, а следовательно, применимых не во всех случаях.

Таким образом, сложность разработки базовой модели в том, что:

- 1) процессы трансформации и перемещения массы и энергии происходят одновременно;
- 2) все факторы и процессы взаимосвязаны, то есть один фактор зависит от множества других;
- 3) численные значения факторов изменяются по атмосферным и почвенным слоям.

Поэтому при разработке модели применяются определённые допущения, незначительно снижающие точность работы модели, но существенно облегчающие моделирование.

Первым допущением примем, что процессы протекают во времени с разными скоростями, что позволяет считать их дискретными. По Р.А. Полуэктову [5], процессы делятся на быстрые, среднего темпа и медленные.

Быстрые процессы протекают доли минуты. К ним относятся тепло- и влагоперенос в посевах, газоперенос в межклеточном пространстве посева, диффузия углекислого газа из атмосферы в межклеточное пространство листа, поглощение, отражение и пропускание листом солнечной радиации, ветер и др.

Процессы среднего темпа протекают за несколько часов. Например, тепло- и влагоперенос в почве, миграция ионов по почвенному профилю, дыхание почвы и др.

Медленные процессы протекают в течение нескольких суток: рост органов и линейных размеров растения, экологические взаимодействия организмов, процессы гумификации и минерализации органических веществ, динамика численности популяций и др.

Быстрые процессы протекают так быстро, что динамикой их можно пренебречь, считая, что в течение часа значения их постоянны. Ориентация шага расчета исключительно на медленные процессы приводит к большим погрешностям, так как временной интервал (шаг модели) между значениями отдельных факторов столь велик (несколько суток), что за это время может произойти масса существенных воздействий, которые могут изменить состояние экосистемы, но не будут учтены моделью.

Итак, для описания динамики за *минимальный шаг расчета берутся среднескоростные процессы с интервалом 1 час*. Для медленных процессов шаг модели составляет 1 сутки и более, если в течение этого времени изменение параметров нельзя определить приборами. Например, при расчете динамики температуры почвы на вход подается температура воздуха (быстрый процесс) с интервалом 1 час и влажность почвы (медленный процесс) с интервалом 24 часа (1 сутки) (рис. 15).

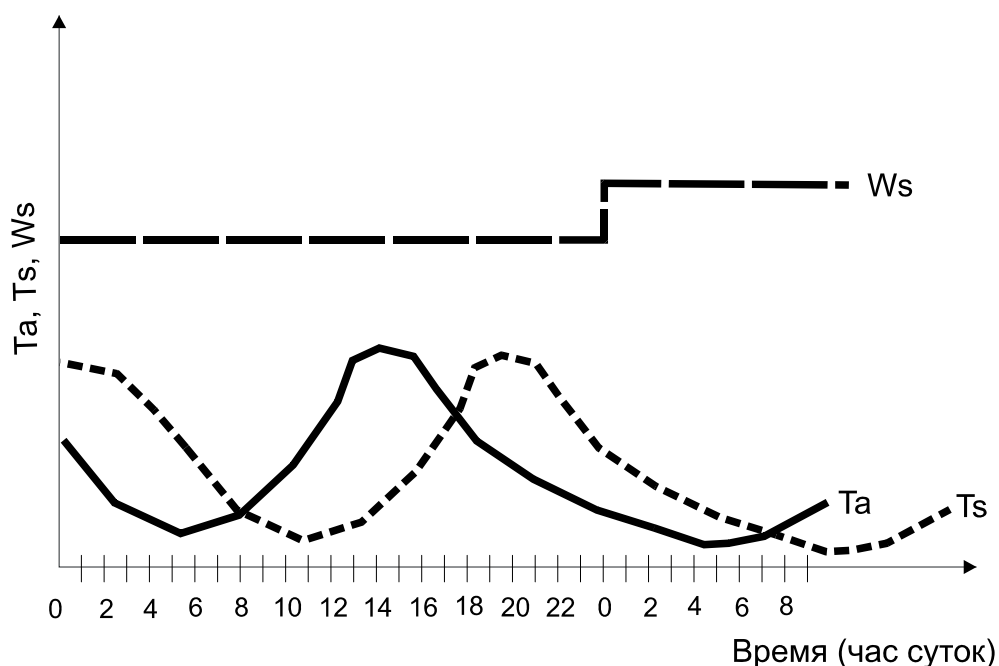


Рис. 15. Интервал изменения параметров температуры воздуха T_a , температуры почвы T_s и влажности почвы W_s

Параметры, описывающие динамику биомассы растения, могут пересчитываться с интервалом несколько суток (рис. 16). Это зависит от вида растения (одни увеличивают размеры и массу быстрее, другие — медленнее) и от его возраста (есть фазы быстрого роста). Сами фазы развития изменяются через еще более длительный интервал.

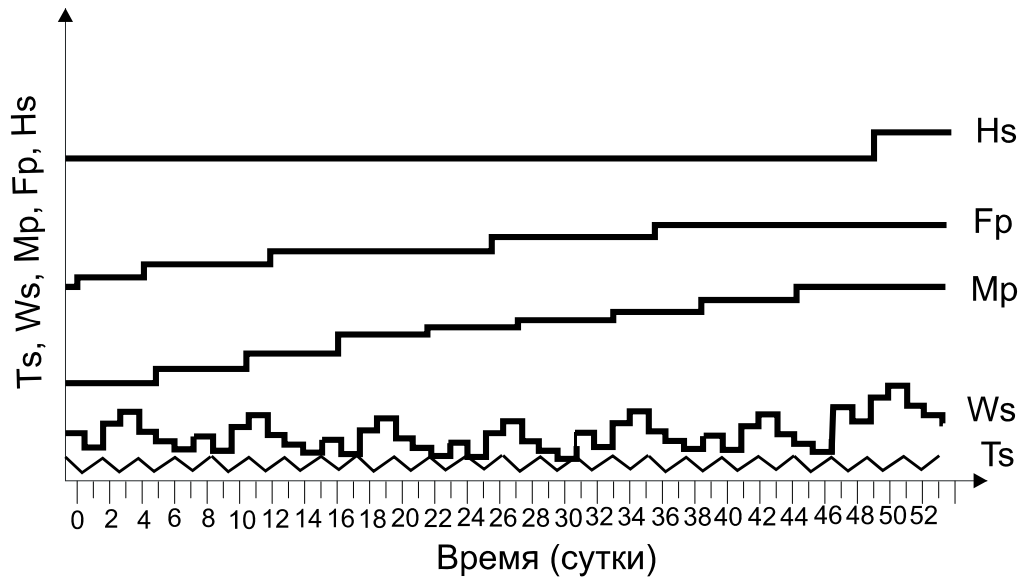


Рис. 16. Интервал изменения параметров температуры почвы T_s , влажности почвы W_s , биомассы растения M_p , фаз развития растения F_p , органического вещества почвы H_s

Таким образом, моделируются одновременно протекающие процессы. Теперь рассмотрим, как упростить их взаимодействия. В экосистеме каждый элементарный (одиночный) процесс связан со всеми остальными. Эта цепочка очень длинная и разветвленная. Учесть все факторы невозможно, поэтому широко распространенные в настоящее время регрессионные модели либо не учитывают какие-то факторы, либо учитывают результат совместного их действия в виде коэффициентов при переменных.

Пользуясь теорией структурного моделирования, можно значительно облегчить решение. Для этого достаточно связать и учесть взаимодействия соседних звеньев в одном модуле, а потом через общие входные и выходные параметры связать модули между собой.

2.3. Построение компартментальных моделей

Для объекта моделирования выберем однородный посев достаточной площади, позволяющей пренебречь эффектом края поля [5]. При таком допущении все потоки вещества и энергии будут направлены или сверху вниз, или снизу вверх. Выделим на этом поле участок единичной площади (например, 1 м^2) высотой H , примерно равной утроенной высоте посева hl . Нижняя граница проходит на некоторой глубине R за пределами корнеобитаемого слоя r . Это и будет объект моделирования (рис. 17).

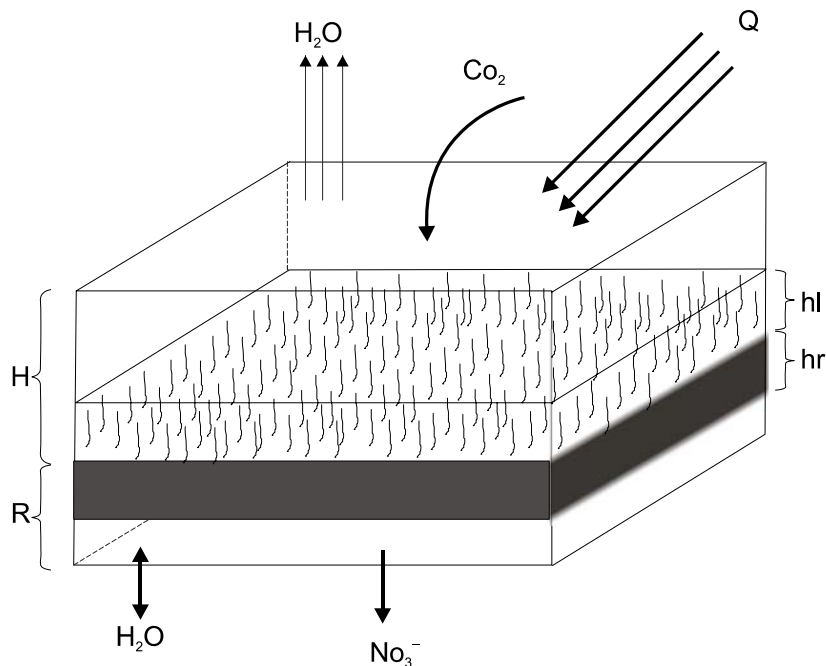


Рис. 17. Посев как объект моделирования
(по Р.А. Полуэктову, 1991)

В выделенный объем сверху поступает солнечная радиация Q и углекислый газ (CO_2), через верхнюю же грань удаляются из экосистемы пары воды. В нижней грани из системы теряются вода и нитратные соединения, поступающие в конечном счете в грунтовые воды, а из грунтовых вод поступает вода вместе с растворенными в ней минеральными веществами. Все, что поступает в выделенный объект, относится к *входным* воздействиям, все, что удаляется (в том числе и убранный урожай) — к *выходным*. Вот эти процессы и надо описать.

Однако дело осложняется их динамичностью в пространстве (рис. 18), а потому модель должна учитывать количественные характеристики не только через определенный временной шаг, но и на определенной высоте посева или глубине почвы.

Например, описав зависимость температурного и водного режимов почвы, мы все же не получим точного результата, так как показатель запасов влаги в метровом слое почвы дает очень мало информации. Верхние слои почвы могут быть пересохшие, средние — иметь нормальную влажность, а нижние — быть переувлажненными (особенно при близком стоянии грунтовых вод). В среднем же влаги в почве достаточно, но посеянные семена фактически испытывают в ней недостаток. Следовательно, если необходимо получить модель, максимально приближающуюся по функциям к реальному объекту, следует разбить объект моделирования на горизонтальные слои — компартменты.

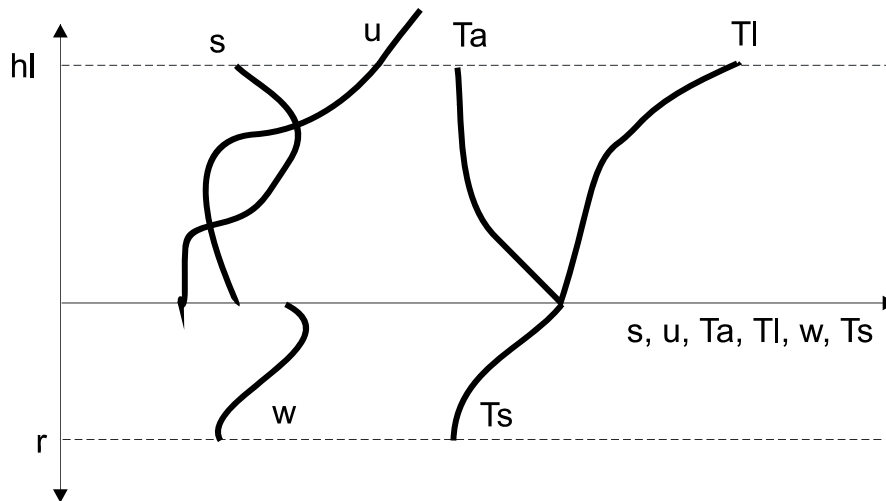


Рис. 18. Распределение фитозлементов и параметров среды обитания растений:

s — объемная плотность листовой поверхности;
 w — объемная плотность поглощающей поверхности корней;
 u — скорость ветра; T_a , T_l , T_s — температура воздуха, листьев и почвы (по Р.А. Полуэктову, 1991)

Компартмент — элементарный функционирующий элемент модели, характеризующийся определенным количеством какого-либо фактора. Толщина компартмента должна быть такой, чтоб разница в количестве фактора на верхней и нижней границе не была слишком большой. Тогда можно подразумевать, что на какой-то высоте (или глубине) значение фактора не изменяется. Это помогает превратить непрерывную функцию в дискретную.

Итак, разобьем почвенный слой на несколько слоев малой толщины (рис. 19) и выделим один для подробного рассмотрения. Пусть это будет слой i . Ниже его расположены слои с номерами $i + 1$ и $i + 2$, а выше — $i - 1$ и $i - 2$. Теперь попробуем описать баланс почвенной влаги внутри этого слоя, то есть опишем динамику водного компартмента (слой почвы становится компартментом, если в нем присутствует соответствующая субстанция, в данном случае — влага).

Если почву не делить на слои, то содержание влаги в ней рассчитывается по уравнению

$$W = Fg - Ft - f,$$

где Fg — поток влаги из грунтовых вод;
 Ft — испарение с поверхности почвы;
 f — поглощение воды корнями.

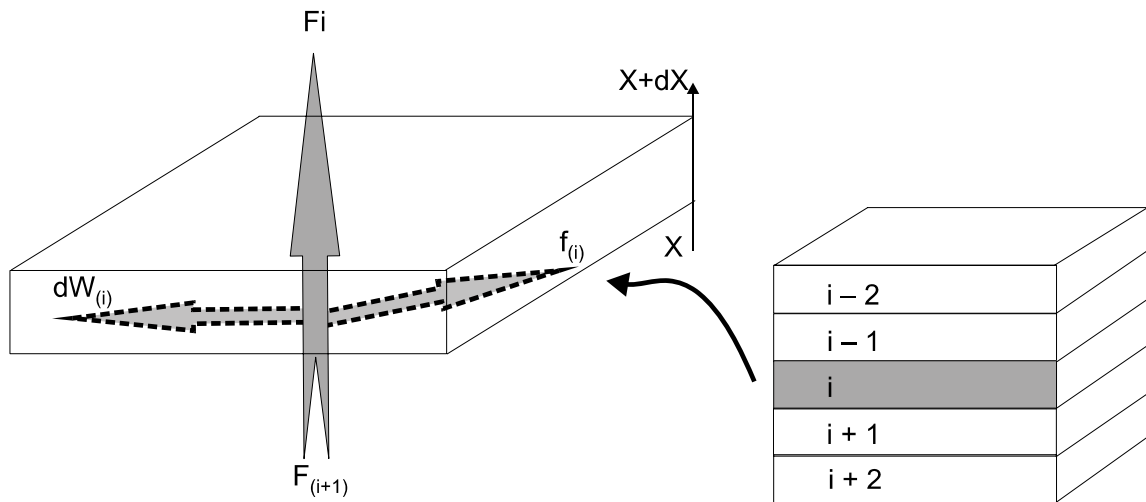


Рис. 19. К понятию компартмента
(по Р.А. Полуэктову, 1991)

Это уравнение описания водного режима корнеобитаемого слоя почвы может быть названо *однокомпарментальной моделью*. При разделении корнеобитаемого слоя на компартменты, водный баланс каждого будет складываться из следующих составляющих:

- обмен влагой с нижележащим компартментом;
- обмен влагой с вышележащим компартментом;
- превращение влаги внутри компартмента в другую форму.

А одно уравнение превратится в систему уравнений типа

$$dW_{(i)} = F_{(i+1)} - F_{(i)} - f_{(i)},$$

где $dW_{(i)}$ — запасы влаги в i -м компартменте за один временной шаг модели;

$F_{(i+1)}$ — поток влаги из нижележащего компартмента;

$F_{(i)}$ — поток влаги в вышележащий компартмент;

$f_{(i)}$ — поглощение воды корнями, расположенными в i -м компартменте.

При работе модели отдельные слагаемые могут менять знак или обращаться в нуль. Компартменты по температуре, нитратам и другим факторам должны находиться в том же самом слое почвы, то есть почва и надземная часть экосистемы делится на слои одинаковой для всех факторов толщины.

Например, схема компартментального распределения наземной и подземной частей экосистем имеет вид:

Высота, см	Номер компартмента	Высота компартмента, см	
200	20	10	
190	19	10	
.....	
30	3	10	
20	2	10	
10	1	10	атмосфера
0	0	0	
5	1	5	почва
10	2	5	
15	3	5	
20	4	5	
40	5	20	
80	6	40	
120	7	40	
160	8	40	
270	9	110	
320	10	50	
Глубина, см	Номер компартмента	Высота компартмента, см	

Таким образом, мы выяснили, что все процессы, происходящие в любой экосистеме, можно объединить в несколько модулей, связи между компонентами которых гораздо сильнее, чем между модулями. Это значительно облегчает как сам процесс моделирования, так и пользование реализованной моделью. В первом случае можно «безболезненно» вносить необходимые дополнения и изменения в программу, а во втором — отключить ненужные блоки и вводить вместо них константы.

Агроэкосистема, как и любая экосистема, является открытой, следовательно, если мы в том или ином виде выносим из нее часть вещества и энергии, то должны внести эквивалентную часть. В противном случае нарушается баланс и система становится нестабильной.

Для более точного описания балансовыми уравнениями процессов трансформации вещества и энергии строятся компартментальные динамические модели.

Контрольные вопросы

1. Какие факторы и процессы действуют в открытых и замкнутых экологических системах?
2. Что такое динамические модели, какие требования и допуски учитываются при разработке динамических моделей агро-экологических систем?
3. Что такое компартмент, какая методика применяется для разработки компартментальных динамических моделей?

3. РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ЭКОСИСТЕМЫ

3.1. Солнце как основной источник тепла и света для растения

Основным энергетическим фактором большинства экосистем является солнечная радиация. Жизнь на Земле возникла, развивалась, продолжает развиваться и существовать благодаря Солнцу. Энергия солнечных лучей преобразуется в процессе фотосинтеза в органические соединения, которые составляют 90...95% биологической массы растения. На долю минеральных элементов приходится всего лишь 5...10%. Поэтому-то русский физиолог К.А. Тимирязев в основу плодородия почвы, а следовательно, и урожайности культур ставил не количество внесенных удобрений, не количество полученной влаги, а именно солнечную энергию.

Каким же образом мощное излучение самого крупного объекта в Солнечной системе доходит до микроскопического хлоропласта? С того момента, как на огромном (диаметром 1 393 000 км) Солнце образовался квант света, до того момента, когда он попал на Землю, преодолев 149 680 000 км космического пространства, проходит 8 минут (рис. 20).

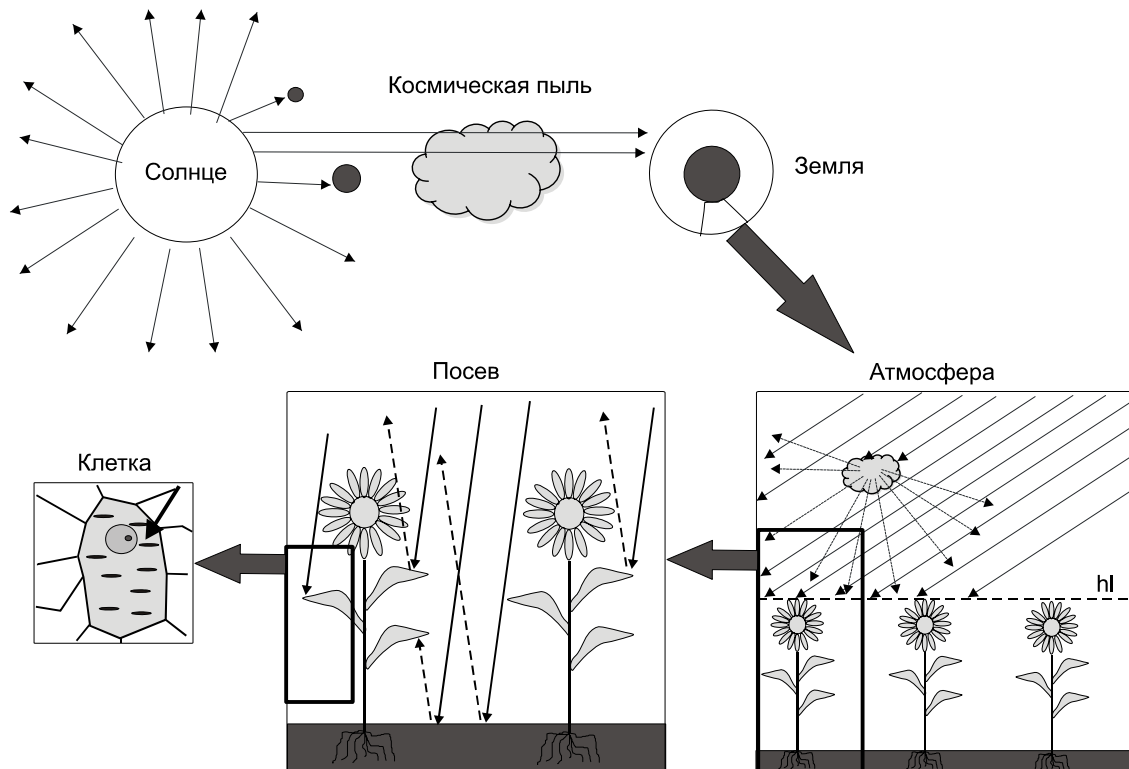


Рис. 20. Схема распределения солнечной радиации:

_____ — прямой; - - - - - — рассеянной; — отраженной

Пока лучи путешествуют по космосу, часть их теряется, поглощаясь встречающимися на их пути планетами, метеорами, космической пылью и т.д. Оставшаяся радиация попадает на верхнюю границу атмосферы Земли, которой все живое обязано своим существованием, так как спектр солнечной радиации содержит не только видимую (свет) и тепловую, но и, что опаснее всего, радиацию с длиной волны менее 0,25 мкм, то есть рентгеновское и часть ультрафиолетового излучения. Эти волны задерживаются озоновым слоем.

В нижних слоях атмосферы, называемых тропосферой, конденсируется большое количество влаги, образующей облака. Они тоже снижают интенсивность радиации и тем больше, чем больше их количество.

Наконец, ничтожная, по сравнению с исходной, часть *естественной радиации* — световой энергии, которую растения получают от солнца, — попадает на верхнюю границу посева. Если бы вся она использовалась на производство биомассы, то мы бы получали урожаи до 100...150 т/га зерна. Однако этого не происходит. Любая поверхность, если это не абсолютно черное тело, отражает часть радиации, причем коэффициент отражения (альbedo) зависит от угла наклона источника света к освещаемой поверхности. Итак, часть радиации отражается от верхней границы посева. Оставшаяся часть света проходит в растительный покров и перераспределяется внутри посева следующим образом:

- 1) часть лучей проходит, минуя растения, попадает на почву и используется на ее нагревание. Но не вся, ведь почва тоже обладает коэффициентом отражения;
- 2) часть лучей попадает на органы растения, где определенная доля их поглощается и отражается, а остальная проходит через лист и попадает на листья нижних ярусов, где, в свою очередь, отражается, поглощается и пропускается. Часть отраженной от почвы и нижних ярусов радиации используется верхними ярусами.

Таким образом, остается только та небольшая доля радиации, которая поглощается зеленым листом. Но не вся она используется на производство биомассы. Большое количество энергии расходуется на передвижение воды и минеральных элементов по растению, транспирацию, перераспределение ассимилятов по различным органам. Все это относится к внутреннему использованию энергии и изучается специальной наукой — физиологией растений.

Итак, вышеизложенное представляет собой вербальную модель, которую можно превратить в графическую (рис. 21), из которой следует, что на продуктивную функцию растением используется теоретически всего 8...10% поступающей солнечной энергии (К.А. Тимирязев), а практически при обычной агротехнике посевы используют только 0,5...3,0% той части радиации, которая идет на фотосинтез, то есть фотосинтетически активной радиации ΦAP . Если всю ΦAP принять за единицу, то доля от нее, используемая растением для формирования биомассы, представляет величину коэффициента полезного действия ΦAP $KПД\phi ar$. Естественно, чем больше $KПД\phi ar$, тем больше биомасса, а следовательно, и урожай. Над решением вопроса повышения $KПД\phi ar$ работают ученые самых разных специальностей, порою даже сами не подозревая этого (например, инженеры, разрабатывая посевные машины). Если привести в систему все эти работы, то, на наш взгляд, получится следующее.

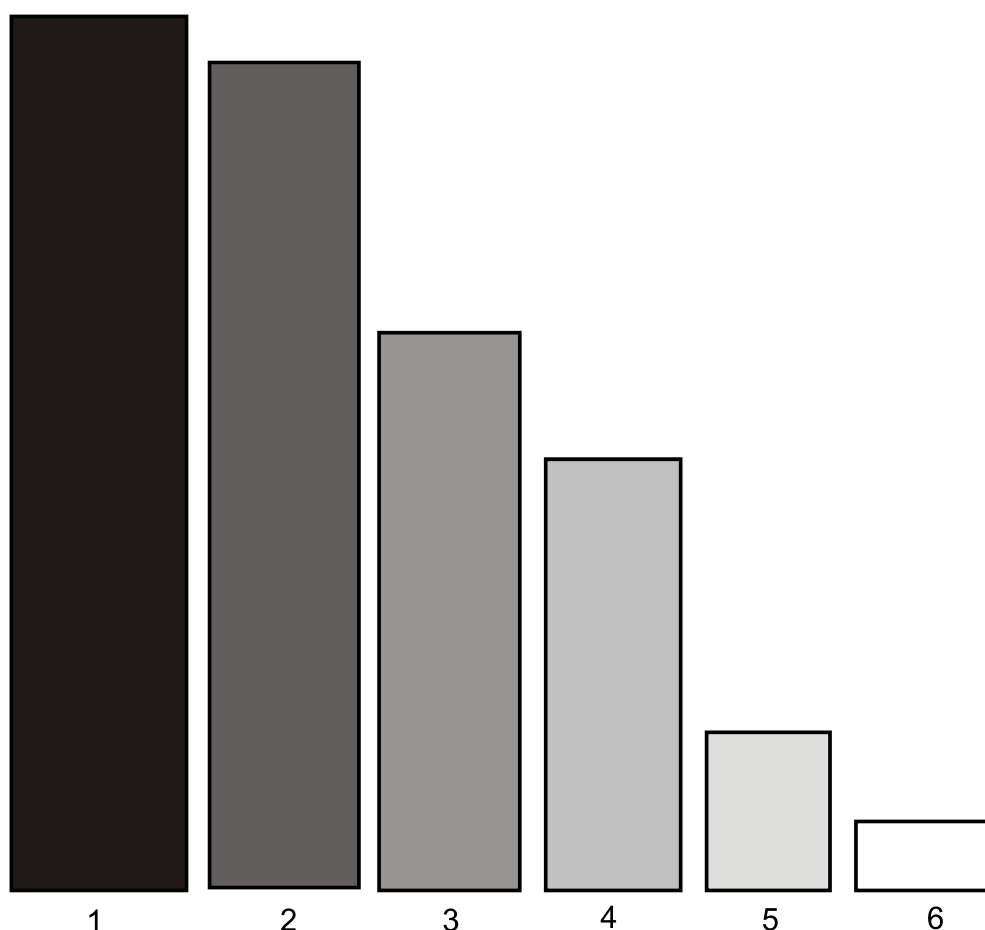


Рис. 21. Соотношение поступающей солнечной радиации:
 1 — Солнце; 2 — на верхней границе атмосферы;
 3 — на верхней границе посева; 4 — внутри посева;
 5 — поглощенная листьями; 6 — закрепленная биомассой

Излучение Солнца может изменяться, так как наблюдаются одиннадцатилетние максимумы и минимумы солнечной активности. Но этот процесс регулировать в обозримом будущем невозможно.

Поглощение энергии Солнца космическими телами, вероятно, уменьшить нельзя, иначе пришлось бы очистить все космическое пространство от источников поглощения.

Интенсивность поступления радиации на верхнюю границу посева можно регулировать, снижая облачность либо лазерными установками, либо распылением с самолетов веществ, способствующих конденсации капельно-жидкой влаги. Однако прием этот очень дорогостоящий и применяется в исключительно редких случаях. Зато снижением прозрачности атмосферы люди занимаются ежедневно, создавая исключительно высокую запыленность и загазованность атмосферы. Кое-где за это уже расплачиваются здоровьем, но, видимо, мы еще не «на краю пропасти», поэтому не все осознают эту проблему.

Основная работа агронома по регулированию *КПДфар* начинается с момента поступления солнечных лучей внутрь посева. Во-первых, если часть радиации проходит мимо растений и попадает на почву, желательно уменьшить эти потери *подбором оптимального количества растений на единице площади* (которая, в свою очередь, регулируется *нормой высева*). Во-вторых, если растение потребляет ФАР от всходов (или начала отрастания) до физиологического отмирания, то чем дольше оно остается зеленым, тем больше накопит биомассы. Следовательно, надо *защищать растение от фитофагов* (разумеется, не до полного уничтожения последних). В-третьих, чем больше площадь листьев и более оптимально их расположение, тем большее количество солнечных лучей будет поглощено листом. Этот вопрос решается *селекцией сортов с повышенной площадью листьев и оптимальной архитектоникой*, а также агротехническими мероприятиями, направленными на *оптимизацию водно-воздушного и теплового режимов и режима питания*.

Перераспределение поглощенной хлоропластами солнечной радиации изучается наукой физиология растений, поэтому здесь этот вопрос не рассматривается. Однако следует отметить, что с помощью методов генной инженерии возможно так изменить генотип, чтоб основная масса солнечной энергии аккумулировалась в виде органического вещества. Прецеденты есть, например, растения из группы C_4 .

3.2. Архитектоника растительного покрова

Р.А. Полуэктов считает, что основной показатель, определяющий $KПДфар$, — это архитектура растительного покрова, то есть *расположение фотосинтезирующих органов по высоте посева и их ориентация в пространстве* [5].

В плотном стеблестое солнечная радиация быстро затухает по мере проникновения вглубь травостоя. В результате листья нижних ярусов начинают испытывать недостаток света, интенсивность фотосинтеза в них снижается, дыхание начинает преобладать. Такой непродуктивный расход энергии растению не нужен, поэтому затененные листья обычно отмирают.

Ориентацию листьев в пространстве можно определить двумя углами: наклоном листовой пластины по отношению к направлению «вверх» O_1 и азимутом расположения листовой пластинки Φ_1 (рис. 22).

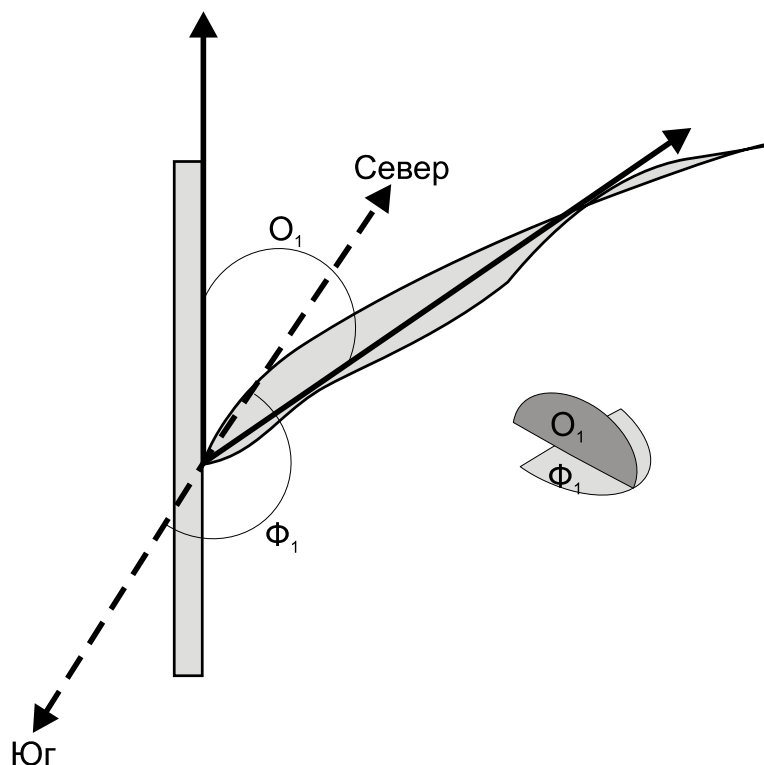


Рис. 22. Углы для характеристики ориентации листьев (по Р.А. Полуэктову)

Для успешного фотосинтеза интерес представляет распределение углов наклона и азимута листьев, а также их изменение по высоте растительного покрова. Причем основной фактор — угол наклона листьев. Так как растение обычно имеет листья разной ориентации, можно говорить лишь о преимущественном их расположении, которое характеризуется функцией распределения

$q(O_1, \Phi_1)$, показывающей долю листьев, имеющих тот или иной угол наклона (рис. 23). Эта функция зависит от биологического возраста и высоты расположения листьев на растении.

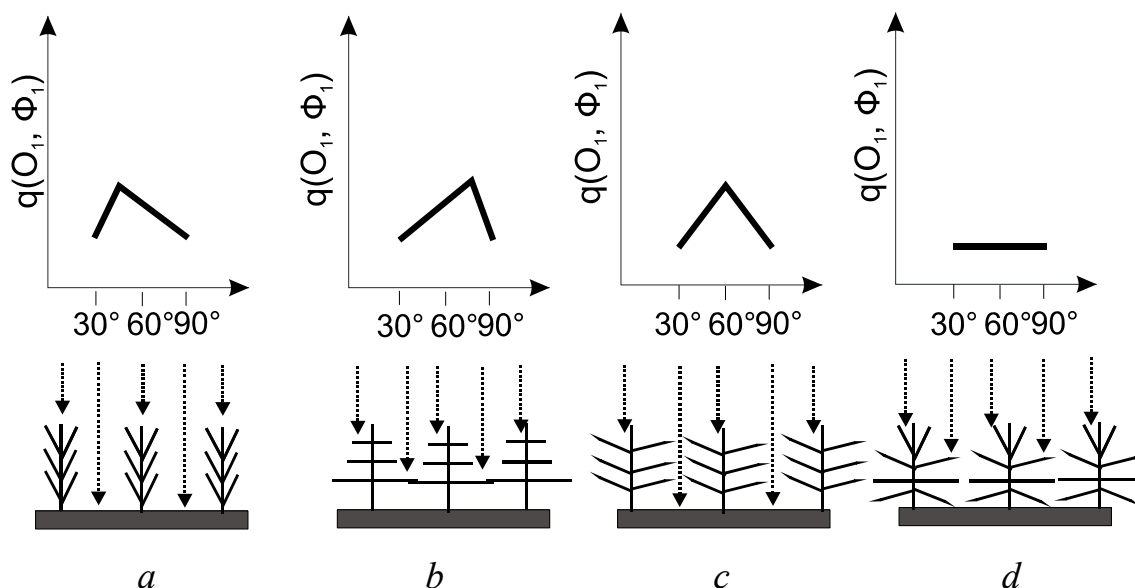


Рис. 23. Распределение листьев на растении:
a — преимущественно вертикальное;
b — преимущественно горизонтальное;
c — промежуточное; *d* — сферическое;
 -----> — поток солнечной радиации

Если листья на стебле расположены вертикально, то солнечные лучи освещают все ярусы листьев, но довольно значительная их часть попадает на почву, то есть расходуется непродуктивно. При горизонтальном расположении листья верхних ярусов будут затенять нижние, которые постепенно отмирают, а общая площадь листового аппарата уменьшается. Промежуточное положение тоже вызывает частичное затенение листьев нижних ярусов. Сферическое распределение является наилучшим, но оно характерно больше для древесно-кустарниковой растительности. Таким образом, для растений полевой культуры самым оптимальным является следующая архитектура: верхний ярус листьев — вертикальное направление, средний — промежуточное, нижний — горизонтальное, что обеспечивается поливидовыми посевами. При этом будет наблюдаться максимальный $KПДфар$, который может дать архитектура посева.

3.3. Малопараметрическая модель первого уровня продуктивности

Теперь, когда мы выяснили, как и в каких условиях происходит поступление и распределение естественной радиации в посевах, перейдем к построению модели накопления биомассы в комфортных условиях, то есть построим модель первого уровня продуктивности.

Для большей наглядности представим процесс получения хозяйственно ценной части биомассы (урожая) в виде структурной схемы (рис. 24).

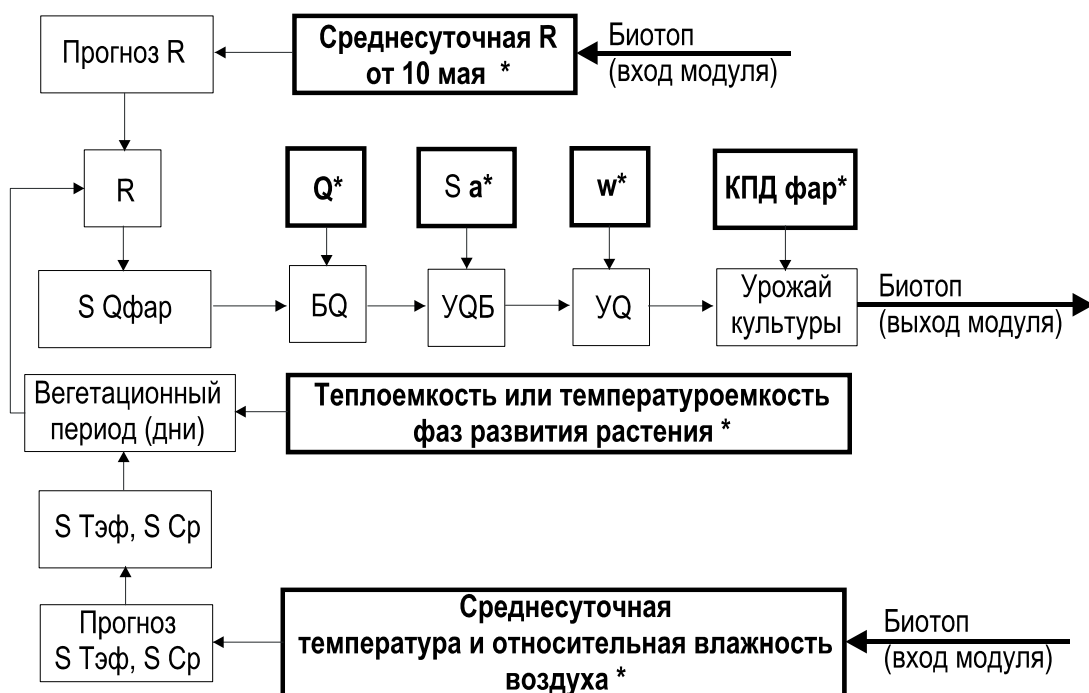


Рис. 24. Структурная схема модели первого уровня продуктивности:
* — предикторы модели

На схеме указаны два основных входа (радиационный и энергетический) и один выход (урожай). Предикторы (исходные параметры) обозначены * и включаются в расчет по мере необходимости. Продуктивность первого уровня зависит от поступающей за период вегетации растения ΦAP и коэффициента ее использования. Сама же ΦAP зависит, в свою очередь, от интегральной солнечной радиации, представляющей собою сумму прямой и рассеянной солнечной радиации.

Прямая солнечная радиация (рис. 25) — это часть лучистой энергии солнца, поступающая к земле в виде почти параллельных лучей. Обозначается она S и имеет размерность $\text{кДж}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$.

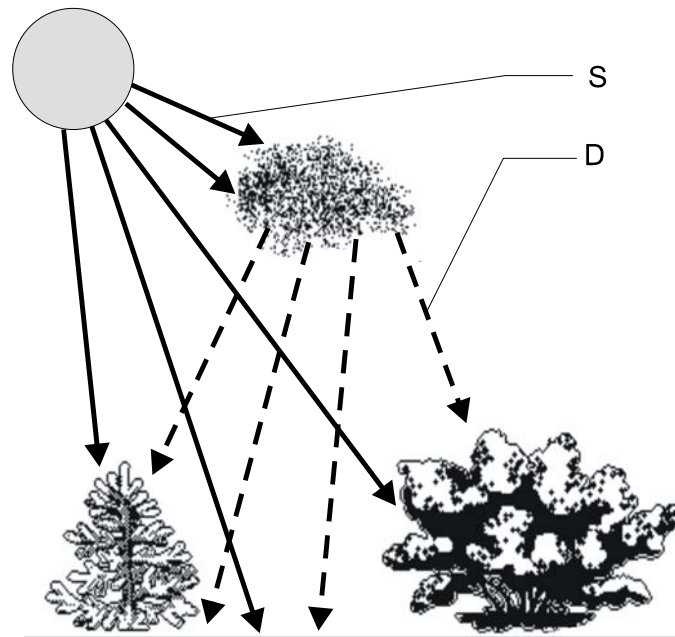


Рис. 25. Солнечная радиация:
S — прямая; *D* — рассеянная

Рассеянная солнечная радиация — часть солнечной радиации, падающая на горизонтальную поверхность после рассеивания атмосферой и отражения от облаков. Обозначается она *D* и имеет размерность $\text{кДж}/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$.

Отсюда интегральная (суммарная) коротковолновая радиация, поступающая на горизонтальную поверхность, состоит из потоков прямой *S* и рассеянной *D* солнечной радиации:

$$R = S \cdot \sin h_o + D,$$

где h_o — угловая высота Солнца над горизонтом, измеряемая в радианах.

При одинаковом радиационном балансе чем меньше угловая высота Солнца, тем больше доля рассеянной радиации. Такой же эффект наблюдается и при облачности, а также при запыленности и загазованности, то есть при снижении прозрачности атмосферы.

При рассеянной радиации энергия квантов света понижена, что отрицательно сказывается на фотосинтезе.

Исследованиями [2], проведенными в Костромской ГСХА, установлена возможность расчета прогноза поступления интегральной радиации с точностью $99,4 \pm 0,2\%$, что позволяет значительно снизить ошибку расчета поступления ФАР в период вегетации по сравнению с традиционно используемыми среднеголетними значениями.

Среднемесячная фактическая динамика R представлена на рисунке 26.

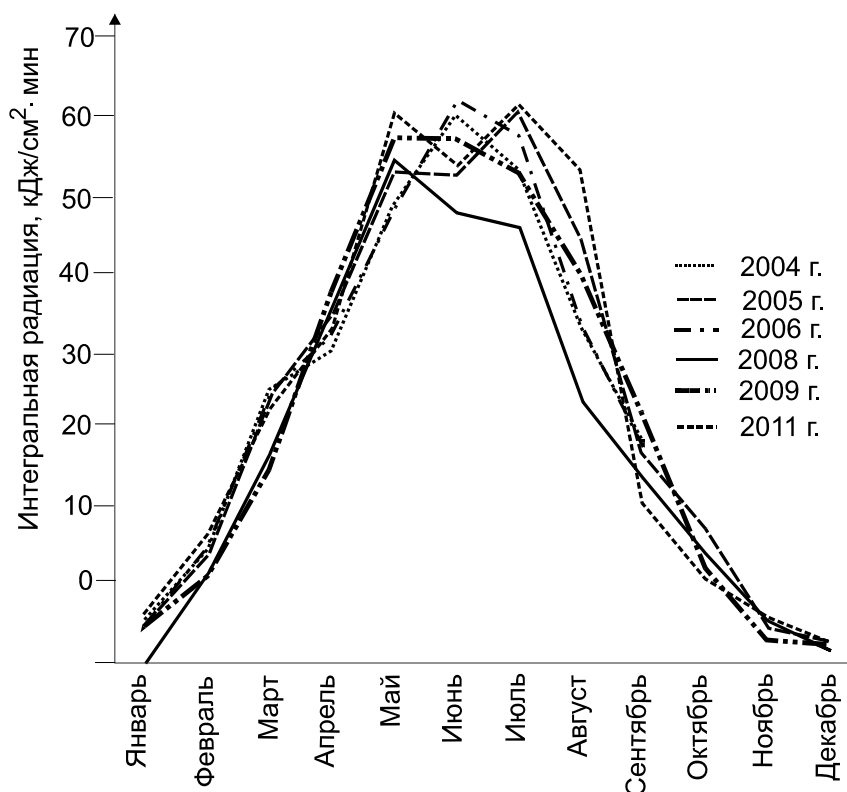


Рис. 26. Распределение интегральной коротковолновой солнечной радиации в течение года (Костромская область)

Линии отражают хорошо выраженную параболическую зависимость величины R по месяцам. Минимальный уровень радиации наблюдается в осенне-зимний период (ноябрь – январь). Начиная с февраля идет нарастание R , что объясняется увеличением угла подъема Солнца над горизонтом и, как следствие, удлинением светлого времени суток. Такая тенденция сохраняется примерно до мая – июня. После летнего равноденствия (22 июня) светлый период суток постепенно сокращается, следовательно, снижается и уровень R . Процесс продолжается до ноября и декабря, когда поступление солнечной радиации минимальное. Среди специалистов тепличных хозяйств этот период называется «мертвым», так как растения останавливаются в росте (хотя продолжают развиваться и стареть).

Несовпадение линий за разные годы говорит о ежегодном варьировании количества поступающей радиации, а пересечение линий — о невозможности использовать стандартную параболическую функцию для прогнозирования. При более мелком дроблении шкалы времени (рис. 27) процесс становится еще сложнее, так как колебания динамики по декадам выражены гораздо сильнее.

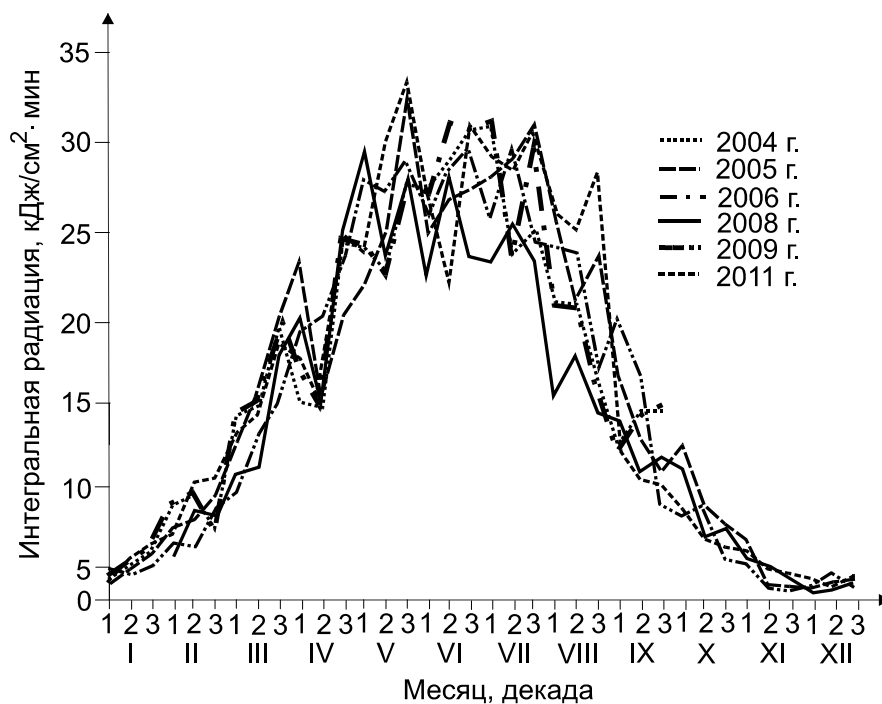


Рис. 27. Распределение интегральной коротковолновой солнечной радиации по декадам года (Костромская область)

Если суммировать R с нарастающим итогом, получаются S -образные линии (рис. 28), расходящиеся, в зависимости от условий года, от 10 января до 10 мая, параллельные — от 10 мая до 31 августа и несколько расходящиеся к декабрю.

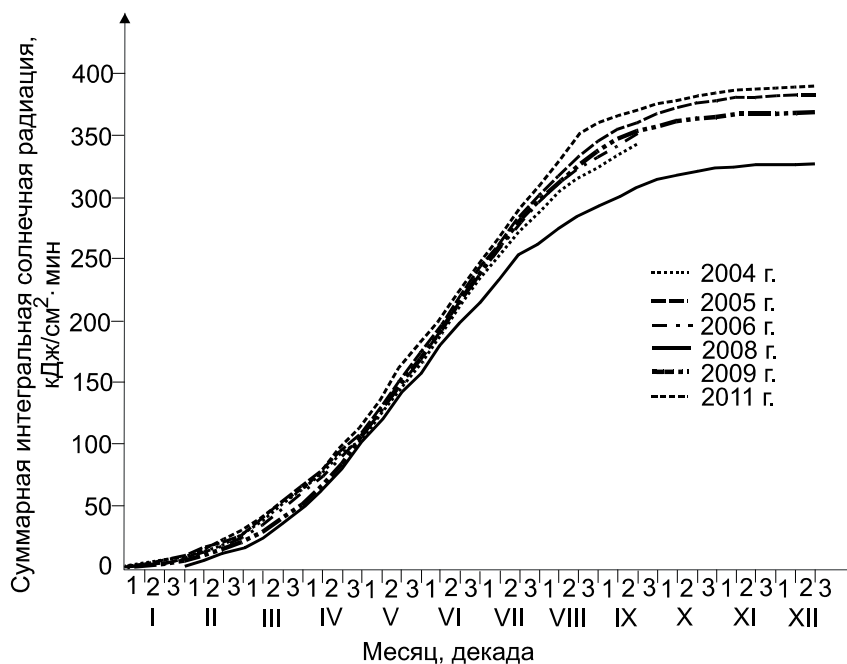


Рис. 28. Нарастание суммарной интегральной коротковолновой солнечной радиации в течение года (Костромская область)

Параллельность линий, каждая из которых представлена прямой, обеспечивает возможность прогнозирования R для довольно значительного интервала вегетационного периода, а именно: от 10 мая до 31 августа (рис. 29).

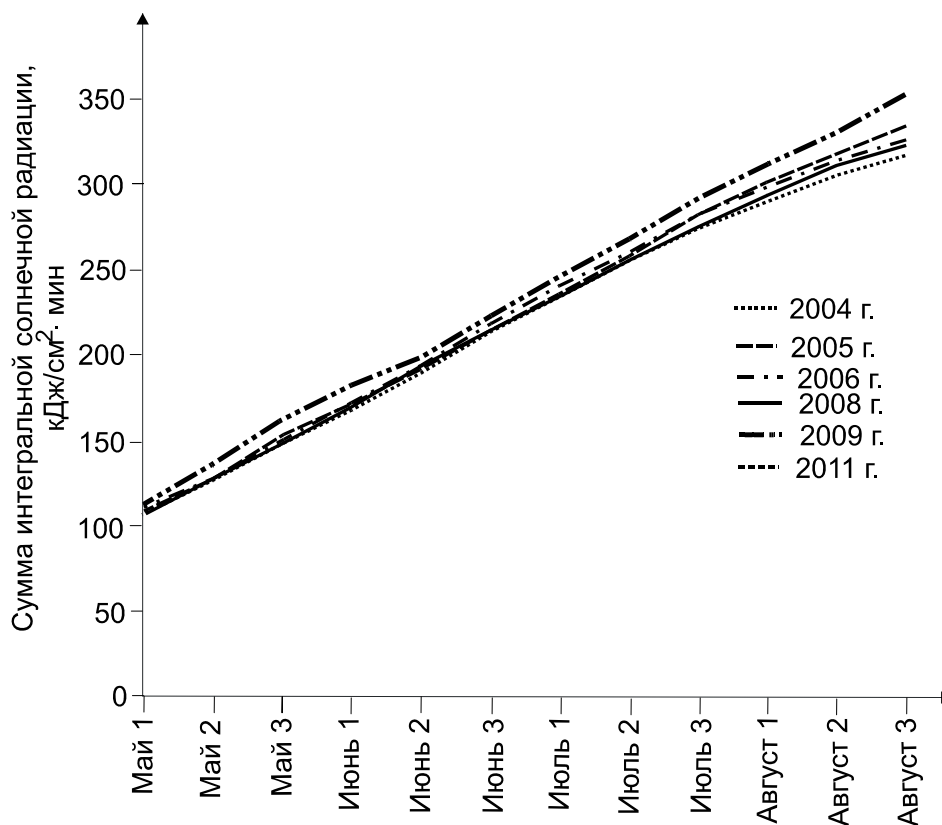


Рис. 29. Параллельность динамики суммарной интегральной коротковолновой солнечной радиации в период с 10 мая – 31 августа (Костромская область)

Хорошо заметна следующая тенденция: если сумма R на 10 мая выше (ниже) средней многолетней, то и до конца августа линия динамики остается выше (ниже). Это отклонение учитывается моделью прогноза. Динамика поступления суммы R является прямой линией и рассчитывается по уравнению

$$R = aX + b. \quad (1)$$

Коэффициенты a и b рассчитываются статистическими методами; значение X — кодированный номер декады (1...12); R — значение интегральной коротковолновой солнечной радиации на заданную декаду.

Коэффициенты уравнения рассчитаны по средним многолетним значениям и расчетные данные соответствуют фактическому приходу суммарной R на 99,4%. Однако в таком виде уравнение не пригодно для прогнозирования, так как ежегодное значение R отклоняется от среднего многолетнего.

Следовательно, для разработки прогностической модели необходимо ввести поправочный коэффициент, позволяющий осуществить параллельный перенос линии выше или ниже средних многолетних значений. Этот коэффициент R' представляет собою разность между фактическим уровнем R_{ϕ} и среднемноголетним $R_{см}$:

$$R' = R_{\phi} - R_{см}. \quad (2)$$

Объединив уравнения (1) и (2) получим:

$$R = aX + b + R',$$

где $R' = 0$, если $R_{\phi} = R_{см}$;

$R' > 0$, если $R_{\phi} > R_{см}$;

$R' < 0$, если $R_{\phi} < R_{см}$.

Таким образом, если меняется знак перед R' , то значения R на начало расчета будут равны, выше или ниже средних многолетних значений.

Точность прогноза поступления интегральной коротковолновой солнечной радиации составляет $99,4 \pm 0,2\%$.

По прогнозу поступления интегральной радиации за период фотосинтетической деятельности растения можно рассчитать полученную ими величину ФАР, которая составляет примерно 52% интегральной:

$$\Sigma Q_{\phi ар} = 0,52R. \quad (3)$$

Остальные 48% — это длинноволновая радиация, обеспечивающая тепловой режим экосистемы.

Итак, по одному входу модели получена солнечная энергия, кДж/см²·мин. Но для расчета суммы ФАР за период фотосинтетической деятельности надо знать продолжительность этого периода. Обычно в расчетах используется среднемноголетний период вегетации в сутках, что приводит к существенным погрешностям в расчетах по причине варьирования продолжительности периода вегетации по годам. Поэтому мы предлагаем использовать разработанный нами прогноз суммы эффективных температур и прогноз суммарной энтальпии воздуха для прогнозирования фаз развития растений.

Оба вида прогноза основаны на энергии, требующейся растению для перехода к следующей фазе развития. Количество этой энергии постоянно как для каждого вида растения, так и для каждого сорта и не зависит ни от погодных условий, ни от зоны произрастания. В связи с тем, что за биологическое время традиционно принимается сумма эффективных температур $\Sigma T_{эф}$ и уже накоплены данные по фазам или продолжительности вегетационного периода большинства культур, этот параметр, несмотря на некоторые его недостатки, можно использовать в модели.

Тепловой режим экосистемы определяется температурой воздуха. Известно, что растения и насекомые имеют пороговую температуру развития.

Эта пороговая температура, при которой прекращается рост и развитие, называется *эффективной температурой*. Для подавляющего большинства растений этот порог составляет +5 °С. Ниже этой температуры рост и развитие прекращается. Поэтому при расчете эффективной температуры из среднесуточной температуры воздуха t_{cp} вычитается пороговая:

$$T_{эф} = t_{cp} - 5.$$

Если суммировать $T_{эф}$ за каждый день вегетационного периода, получается *сумма эффективных температур*:

$$\sum T_{эф} = \sum_{i=1}^n (t_{cp} - 5)_i.$$

Несмотря на то, что сумма эффективных температур давно и широко используется в агрономической практике, до сих пор все расчеты этого критерия ведутся по среднемноголетним значениям, что создает весьма ощутимые неудобства, которые в итоге порождают ошибку в расчетах и вынуждают проводить частую корректировку в период вегетации культур конкретного года.

Естественно, что сумму эффективных температур желательно знать заранее. Иными словами, полезно иметь прогноз. Такая модель разработана в Костромской ГСХА [2]. Она позволяет составить прогноз на период вегетации продолжительностью 150 дней (от 10 мая по 10 октября). Точность 99,2...99,8%. При желании можно периодически проводить корректировку по фактическим данным для повышения точности работы модели.

Модель состоит из системы линейных уравнений:

$$\sum T_{эф} = aX + b + T,$$

где a и b — эмпирические коэффициенты;

X — порядковый номер декады (1-я декада мая — 1, ... 1-я декада октября — 16);

T — динамический коэффициент, зависящий от температурных условий года.

Динамический коэффициент вычисляется по формуле

$$T' = \sum T_{эф} - (aX + b),$$

где $\sum T_{эф}$ — фактическая сумма эффективных температур на начало расчета.

Сумма эффективных температур во времени распределяется по логистической зависимости (рис. 30).

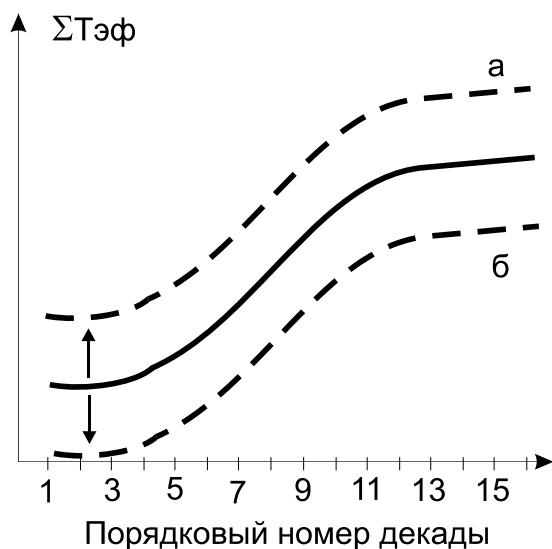


Рис. 30. Отклонения от средней многолетней суммы эффективных температур в теплый (а) и холодный (б) годы

Но поскольку температурные условия каждого года различны, линия параллельно смещается вверх или вниз от средней многолетней величины. Степень смещения и определяет коэффициент T . Таким образом, значение суммы эффективных температур на начало прогноза определяется разностью между фактической и средней многолетней на 10 мая или на любую последующую декаду. Теперь, зная сумму эффективных температур от начала вегетации (для многолетних и зимующих растений) или от даты посева (для яровых культур) до конца соответствующей декады, и зная необходимую сумму эффективных температур для фазы развития, по графику можно установить календарные сроки периода вегетации в целом, продолжительность каждой фазы и фотосинтетический период культуры при известной дате посева.

Однако важна не температура воздуха сама по себе, а тепло, которое содержится в воздухе. Какая же между ними разница?

Прежде всего, ответьте на такой вопрос: что быстрее нагревается: 1 литр воды или 1 литр воздуха? Конечно, воздух. А почему? Да потому, что теплоемкость воды гораздо выше. Аналогично, влажный воздух будет потреблять и накапливать больше тепла. Следовательно, энтальпия (теплосодержание) его будет увеличиваться по мере увеличения относительной влажности. Иными словами, *при одной и той же температуре в воздухе будет содержаться, а следовательно, и передаваться организмам тем больше тепла, чем выше влажность воздуха.*

Таким образом, объединяются уже два климатических параметра: среднесуточная температура и относительная влажность воздуха. Этот параметр и называется *энтальпией воздуха*:

$$Cp = \frac{0,24t_{cp} + 0,001 \cdot 622 \cdot 0,01fq}{(P - 0,01fq)(595 + 0,46t_{cp})},$$

где Cp — энтальпия, Ккал/кг;

t_{cp} — среднесуточная эффективная температура воздуха, °С;

f — упругость насыщенных водяных паров при данной температуре, мм рт. ст.;

q — среднесуточная относительная влажность воздуха, %;

P — атмосферное давление, мм рт. ст.

Это расчёт энтальпии воздуха за 1 сутки. Если просуммировать фактическую энтальпию за несколько дней, получим критерий, аналогичный сумме эффективных температур:

$$\Sigma Cp_{\phi} = \sum_{i=1}^n Cp_i.$$

Расчет ΣCp_{ϕ} ведется от момента схода снега (или посева культуры) до конца 1-й декады мая или любой последующей.

Аналогично прогнозу интегральной радиации и суммы эффективных температур строится модель прогноза суммарной энтальпии (рис. 31).

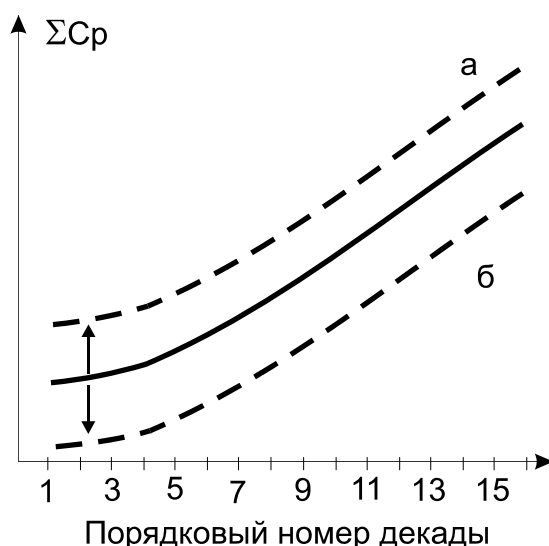


Рис. 31. Отклонения от средней многолетней суммарной энтальпии воздуха в теплый (а) и холодный (б) годы

Динамическая регрессионная модель прогноза описывается уравнением

$$Cp = aX + b + Cp',$$

где Cp' — динамический коэффициент;

X — порядковый номер декады (1-я декада мая — 1, ... 3-я декада августа — 12).

Динамический коэффициент Cp' описывает отклонение фактически наблюдаемой энтальпии на начало прогноза от средней многолетней:

$$Cp' = \Sigma Cp_{\phi} - (aX + b).$$

Когда рассчитан прогноз тепла, поступающего к растению в весенне-летний период, можно вычислить продолжительность как вегетационного периода в целом, так и каждой фазы развития в складывающихся погодных условиях конкретного года. Для этого потребуется еще один параметр: *теплоемкость фазы*, то есть количество тепла, необходимое растению для перехода в следующую фазу развития.

Для примера составим прогноз фаз развития ячменя Зазерский 85. Предположим, что по прогнозу от даты посева (3 мая) суммарная энтальпия распределилась так, как показано на рисунке 32.

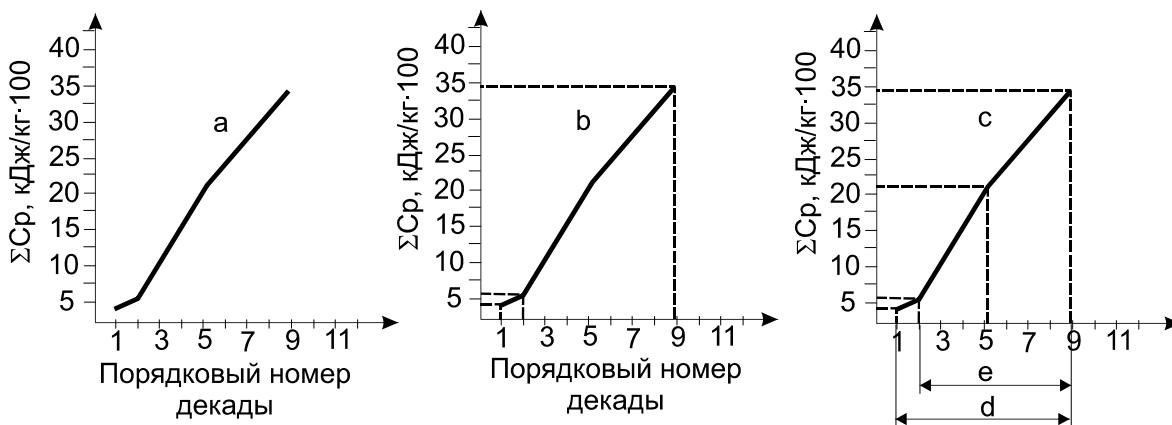


Рис. 32. Схема составления прогноза фаз развития ячменя:

a — построение графика суммарной энтальпии воздуха;

b — определение даты фаз развития; *c* — продолжительность вегетационного (*d*) и фотосинтетического (*e*) периодов

Построим графическую модель (см. рис. 32, *a*). Затем, зная теплоемкость фаз развития, переведем энтальпию в календарные сроки (см. рис. 32, *b*).

Например, суммарная энтальпия фенологических фаз ячменя составляет:

Всходы	330,2 кДж/кг;
Начало кущения	612,6 кДж/кг;
Колошение	2090,4 кДж/кг;
Восковая спелость	3317,2 кДж/кг,

то по графику находим календарные даты фаз развития:

Всходы	10 мая;
Начало кущения	20 мая;
Колошение	21 июня;
Восковая спелость	29 июля.

Теперь несложно установить период вегетации (3 мая ... 29 июля) и период фотосинтетической деятельности (10 мая ... 29 июля) (см. рис. 32, с).

Для дальнейших расчетов величины первого уровня продуктивности необходимо знать количество интегральной радиации, полученное растением за фотосинтетический период. Следовательно, надо рассчитать прогноз интегральной радиации за период 10 мая – 29 июля и установить суммарную интегральную радиацию на конец этого периода, то есть на 29 июля. Это значение вводим в формулу (3) и получаем суммарное поступление ФАР ($\Sigma Q_{\text{фар}}$) за вегетационный период *конкретной культуры и сорта при данной дате посева в условиях конкретного прогнозируемого года.*

Таким образом, соединяются оба входа модели и рассчитывается величина $\Sigma Q_{\text{фар}}$ на период фотосинтетической активности растения, продолжающийся от всходов (или начала отрастания) до отмирания фотосинтетических органов (или скашивания). Теперь можно рассчитывать величину прогнозируемого урожая.

Вначале вычисляется общая биомасса (корни и надземные органы) BQ при нулевой влажности, т.е. абсолютно сухое вещество, по формуле

$$BQ = \frac{10000 \Sigma Q_{\text{фар}}}{q},$$

где BQ — количество абсолютно сухой биомассы, т/га;

$\Sigma Q_{\text{фар}}$ — суммарное поступление ФАР за фотосинтетический период, кДж/см²·мин;

q — калорийность (энергоёмкость) единицы сухого вещества, кДж/кг.

Но количество биомассы — это еще не совсем урожай, поскольку обычно используется только часть ее (корнеплоды, семена, зеленая масса и др.). Следовательно, надо ввести соотношение основной и побочной продукции. Например, если на 1 часть зерна приходится 2 части соломы и корней (соотношение 1:2), то $\Sigma a = 1 + 2 = 3$. Эту величину и вводим в формулу

$$Y_{QB} = \frac{BQ}{\Sigma a},$$

где Y_{QB} — абсолютно сухая биомасса основной продукции, т/га;
 BQ — абсолютно сухая биомасса, т/га;
 Σa — сумма частей основной и побочной продукции, безразмерная.

Приведем полученный урожай к стандартной влажности основной продукции, которая зависит от вида продукции (зерно — 14%, корнеплоды — 80% и т.д.):

$$Y_Q = \frac{Y_{QB} \cdot 100}{100 - w},$$

где Y_Q — биомасса основной продукции при стандартной влажности, т/га;
 Y_{QB} — абсолютно сухая биомасса основной продукции, т/га;
 w — стандартная влажность основной продукции, %.

В результате прогнозируется урожайность культуры при 100% использовании солнечной радиации. Но в природе этого не происходит, так как энергия ΦAP расходуется не только на образование пластических веществ: часть идет на синтез АТФ, транспортировку воды, ионов и ассимилянтов, часть расходуется на дыхание. В связи с этим считается идеальным, если на производство биомассы используется 8...10% поступающей ΦAP , в том числе 5...7% на формирование надземной массы. При обычной же агротехнике посевы используют только 0,5...3,0% ΦAP .

Какими же факторами определяется $KПД\Phi AP$? Один мы уже рассмотрели — это архитектура растительного покрова. Другие факторы — густота стояния растений, площадь листьев, обеспеченность растения влагой, минеральным и CO_2 питанием.

С учетом $KПД\Phi AP$ производственная функция урожайности по А.С. Образцову [4] или величина первого уровня продуктивности по Р.А. Полуэктову [5] принимает вид:

$$Y = Y_Q KПД\Phi AP.$$

Согласно схеме (см. рис. 24), этот уровень урожайности имеет самостоятельный выход, но может служить входом на другие модули производственной функции.

Контрольные вопросы

1. Какое значение имеет Солнце для функционирования агро-экологической системы?
2. Дайте определение прямой и рассеянной солнечной радиации.
3. Как зависит количество интегральной коротковолновой солнечной радиации от высоты солнца над горизонтом?
4. Обоснуйте принцип расчета прогноза интегральной солнечной радиации, суммы эффективных температур, суммарной энтальпии воздуха?
5. Какими факторами можно регулировать КПДфар?
6. Что такое архитектура растительного покрова, какая архитектура является оптимальной для процесса фотосинтеза?
7. Принцип построения, входные и выходные параметры мало-параметрической модели первого уровня продуктивности.

4. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ АГРОЭКОСИСТЕМ

4.1. Значение температуры почвы и воздуха для экосистемы

Температура воздуха играет решающую роль в процессах, происходящих в экосистеме (рис. 33).

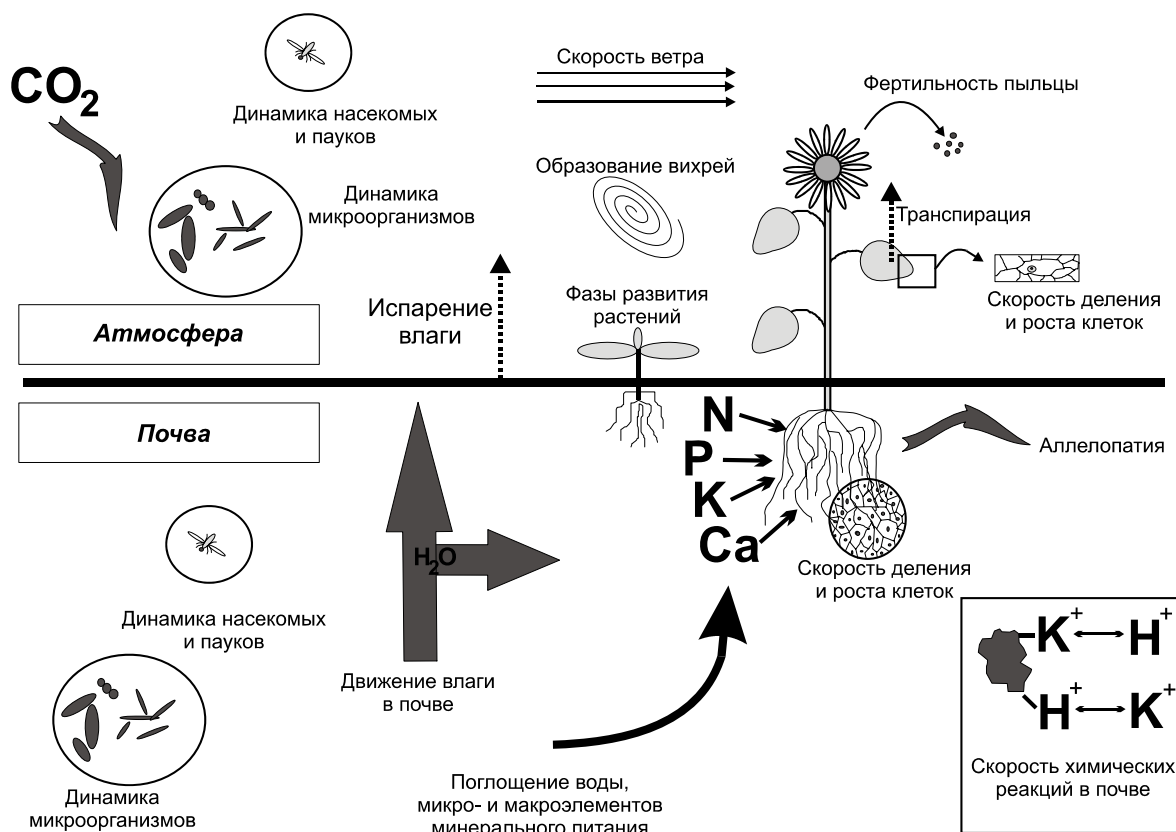


Рис. 33. Связь температуры с процессами, происходящими в экосистеме

С температурным режимом почвы связаны внутрипочвенное испарение и испарение с поверхности почвы, а следовательно, передвижение влаги в почве. Трансформация химических элементов также зависит от температуры, так как этот фактор во многом определяет интенсивность химических реакций. Температура почвы влияет и на скорость деления клеток меристемы корня, обеспечивая таким образом его рост. Кроме того, корневая система поглощает воду и элементы питания тем интенсивнее, чем выше температура.

Микро- и макроорганизмы, населяющие почву, их рост, развитие и динамика численности также обуславливаются температурой почвы.

Температура воздуха внутри посева является внутренним фактором экосистемы, так как не только действует на нее, но испытывает и обратное воздействие. Например, с увеличением температуры воздуха возрастает температура надземной массы органов растения, что вызывает усиление транспирации и, как следствие, снижение температуры воздуха.

Температура оказывает влияние и на скорость ростовых процессов растений, микроорганизмов и *пойкилотермных* (ограниченно способных поддерживать постоянную температуру тела) животных (насекомые, рептилии, земноводные). Скорость развития растений, жизнеспособность их пыльцы и интенсивность фотосинтеза зависят от температуры. *Градиент* (перепад) температуры с высотой определяет скорость и направление перемешивания атмосферы при конвекции и турбулентном движении ветра и вихрей, что, в свою очередь, снабжает растения углекислым газом.

Температура на высоте более 100 м над верхней кромкой посева действует как внешний фактор, то есть она не испытывает обратного действия экосистемы, но сама оказывает существенное влияние на температуру нижележащих слоев воздуха в виде холодных и теплых фронтов.

Таким образом, температура оказывает существенное влияние на интенсивность процессов экосистемы.

4.2. Поступление и распределение тепла в экосистеме

Длинноволновая солнечная радиация практически не оказывает непосредственного действия на воздух из-за его прозрачности. Она почти беспрепятственно (если не считать нагревания взвешенных в воздухе частиц пыли) проникает к непрозрачным элементам экосистемы, коими являются растительность и почва (рис. 34).

Так же, как и коротковолновая, длинноволновая радиация *ДВ* может отражаться, пропускаться и поглощаться почвой и органами растений. Тепловая радиация попадает на верхнюю кромку посева и с этого момента начинается ее действие на компоненты экосистемы. Часть тепла *отражается* от верхнего яруса растительного покрова (количество отраженной радиации зависит от коэффициента отражения (*альбедо*) поверхности). Некоторое количество *поглощается* органами растения и обеспечивает их нагревание (нежелательное при большой интенсивности тепловых лучей). Оставшаяся часть *пропускается* к нижележащим ярусам (компартаментам) растительного покрова.

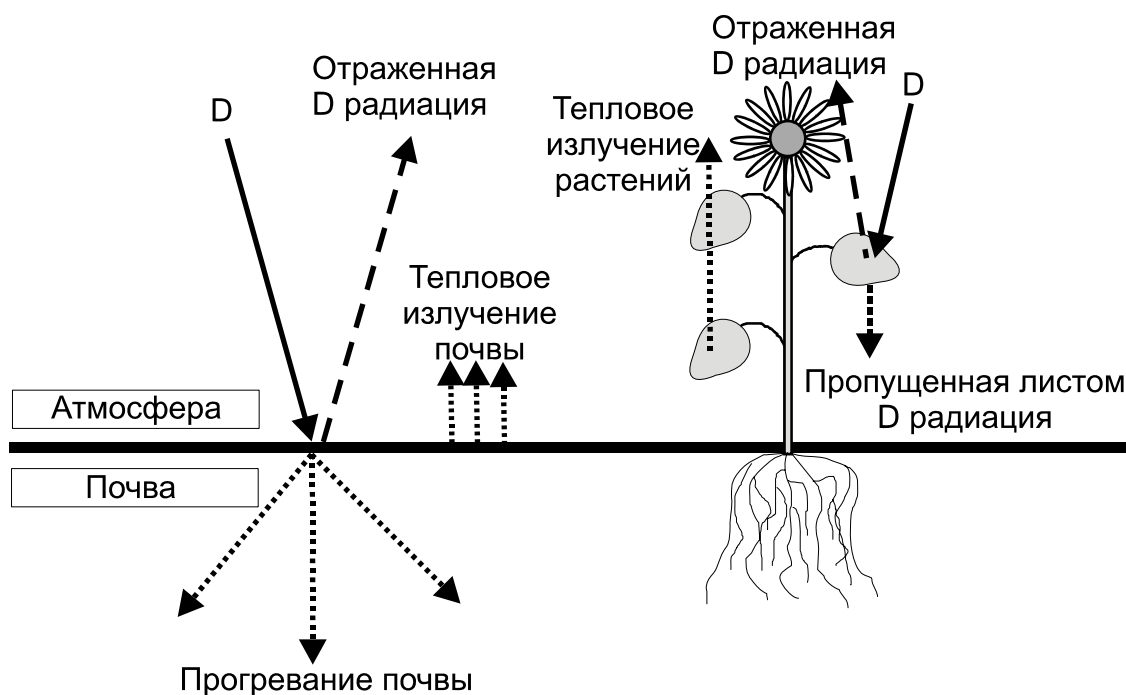


Рис. 34. Поступление и распределение длинноволновой солнечной радиации

Доля пропущенной радиации обратно пропорциональна листовому индексу компартмента — объему листьев в единице объема компартмента, $\text{см}^3/\text{см}^3$.

Естественно, по мере приближения к поверхности почвы интенсивность ДВ радиации снижается. Вот поэтому температура под растительным покровом гораздо ниже, чем на его верхней кромке.

Когда тепловые лучи попадают на поверхность почвы, часть их отражается, остальное поглощается верхним слоем почвы, который начинает нагреваться и излучать тепло как в более глубокие слои почвы, так и в воздух. Воздух начинает прогреваться. Теплые массы поднимаются вверх, а на их место поступают холодные. Таким образом происходит перемешивание и прогревание приповерхностного слоя атмосферы.

Главным отличием агроэкосистемы от экосистемы является то, что пока не появились всходы, она представляет собою почву с населяющими ее компонентами, лишенную растительного покрова. Поэтому солнечные лучи беспрепятственно попадают на ее поверхность и нагревают верхние слои. Поэтому с термического режима почвы целесообразно начать рассмотрение теплопереноса в агроэкосистеме. В экосистемах, а также в многолетних агроэкосистемах, динамика температуры почвы, наоборот, зависит от температурного режима наземной части, которая покрыта растениями и поэтому первая принимает и распределяет ДВ-радиацию.

4.3. Теплоперенос в почве

Изменение температуры верхнего слоя почвы зависит от интенсивности естественной радиации, которая, в свою очередь, зависит от высоты солнца над горизонтом. Поэтому в течение суток температура поверхности почвы достигает минимума примерно в момент восхода солнца, так как ночью температура постепенно снижается, а с восходом начинается прогревание почвы. Когда солнце достигает максимальной высоты над горизонтом (примерно в 14 часов), поверхность почвы имеет максимальную температуру. По мере продвижения солнца к западу угол его склонения уменьшается, что влечет за собой снижение радиации и, следовательно, температура поверхности почвы понижается.

Скорость нагревания верхнего слоя почвы зависит от ее влажности и плотности травостоя (чем выше, тем медленнее прогревание). Суточный ход температуры более наглядно можно представить графически (рис. 35).

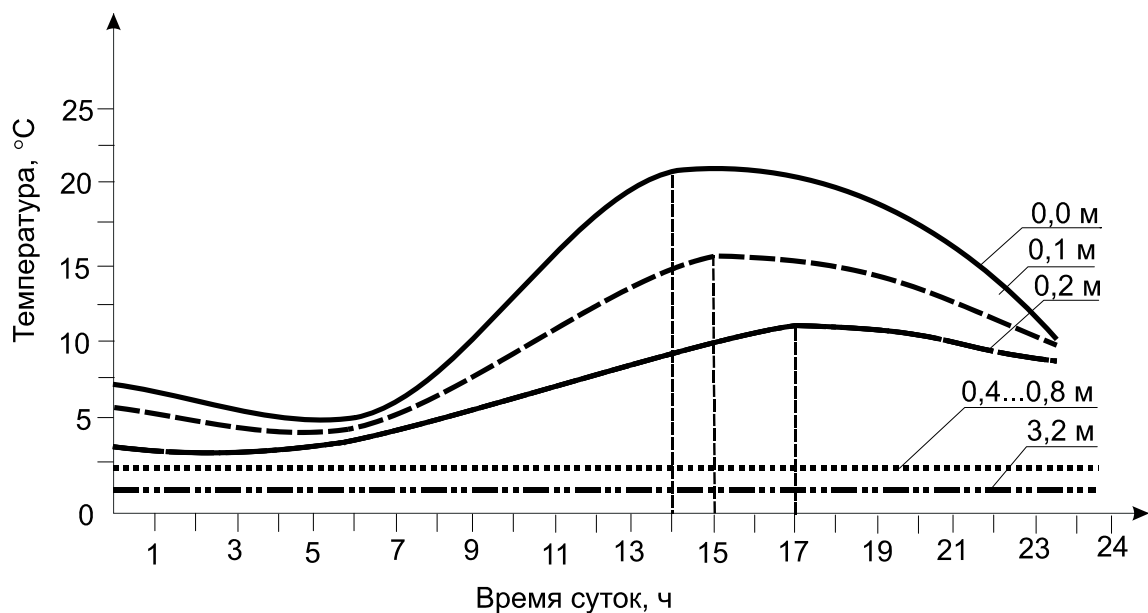


Рис. 35. Суточная динамика температуры почвы в зависимости от глубины

Как видно из рисунка, колебания в суточном ходе запаздывают с увеличением глубины. Если построить профили температуры в летний день, то на глубине 0,4...0,5 м амплитуда колебаний не превышает 2...3 градусов (рис. 36).

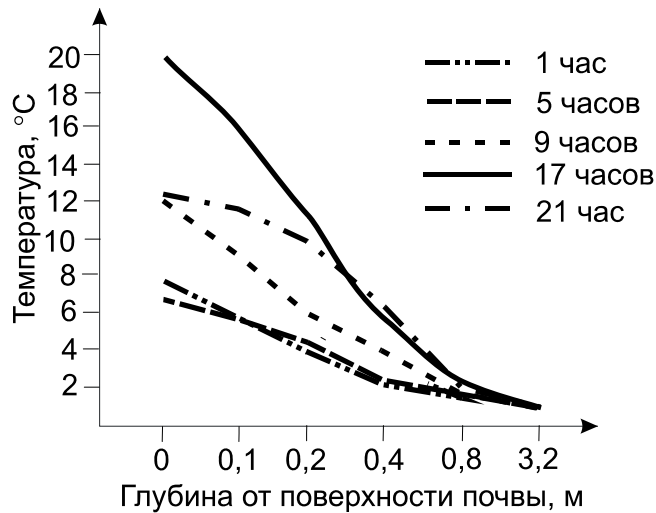


Рис. 36. Суточная динамика температуры почвы в зависимости от глубины

В более глубоком слое почвы (более 1,0...1,5 м) температура в течение суток не изменяется, но имеет хорошо выраженный сезонный ход. В наших средних широтах Северного полушария минимум температуры на этих глубинах наблюдается примерно в конце мая, а максимум — в третьей декаде августа. С точностью до 1 градуса можно считать ее постоянной в течение всего периода вегетации (рис. 37).

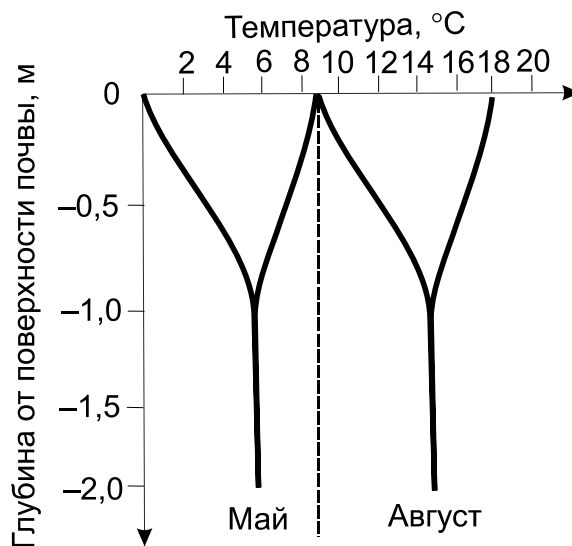


Рис. 37. Сезонная динамика температуры почвы (по Р.А. Полуэктову)

Отмеченные явления (сдвиг максимума во времени и уменьшение амплитуды в зависимости от глубины) объясняется теплофизическими характеристиками почвы, которые представлены теплоемкостью и теплопроводностью.

Теплоемкость — это количество тепловой энергии, которое должно быть сообщено почвенному слою для повышения его температуры на 1 градус. Она зависит на 46% от теплоемкости почвенного скелета (удельной теплоемкости) и на 43% — от плотности почвы (рис. 38).

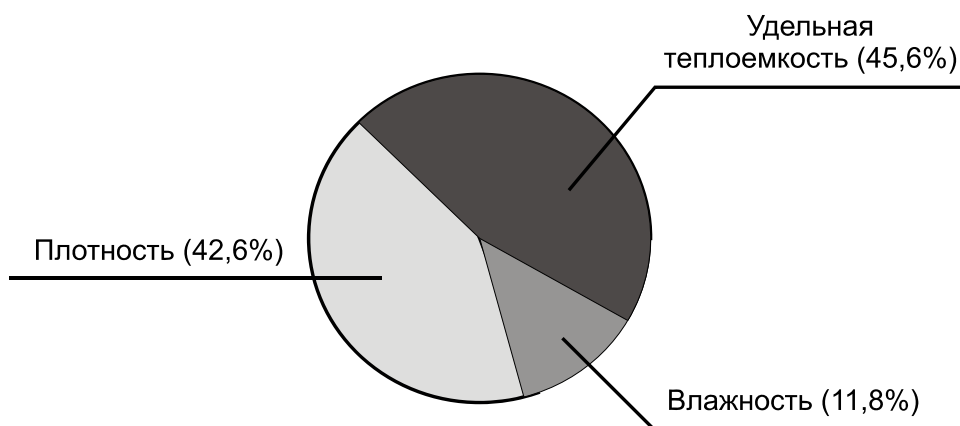


Рис. 38. Соотношение факторов теплоемкости почвы

Теплопроводность — это скорость передачи тепла между почвенными слоями. Она, в основном, зависит от влажности почвы (рис. 39).

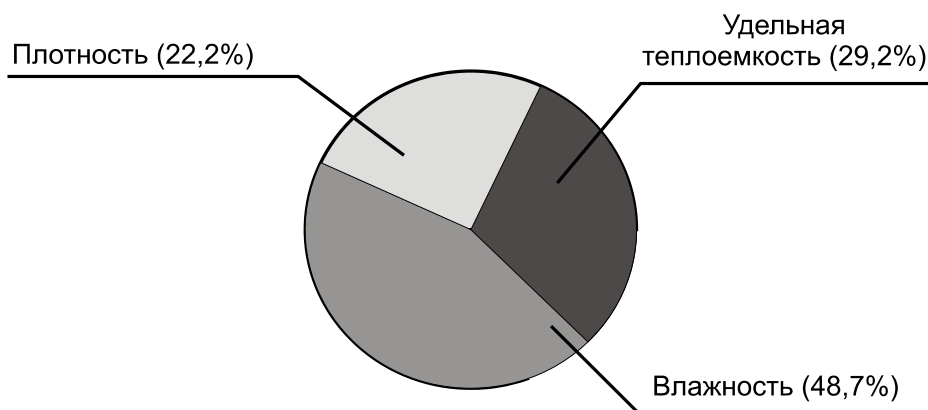


Рис. 39. Соотношение факторов теплопроводности почвы

Таким образом, для описания динамики температуры почвы во времени и по глубине совершенно невозможно использовать усредненные по всему профилю показатели удельной теплоемкости, плотности и влажности, поскольку для каждого слоя они различаются довольно значительно. Следовательно, расчет должен проводиться для каждого слоя отдельно, а потом, используя уравнение теплопроводности, можно связать эти слои между собой уравнениями теплового баланса.

Итак, для построения компартментальной модели модуля термического режима почвы надо задать высоту каждого компартмента. Стандартная глубина мониторинга температуры в агрометеослужбе 0, 5, 10, 15, 20, 40, 80, 120, 160, 270 и 320 см. Поэтому и высота компартментов ориентирована на эти глубины:

Глубина, см	Номер компартмента	Высота компартмента, см
0	0	0
5	1	5
10	2	5
15	3	5
20	4	5
40	5	20
80	6	40
120	7	40
160	8	40
270	9	110
320	10	50

Высота компартмента определяет скорость перетока тепла между соседними компартментами.

Все компартменты по теплообмену равнозначны между собой, за исключением 0 и 10. Нулевой граничит с воздухом, а последний — с большими глубинами. Обычно на большой глубине динамика температуры настолько незначительна, что ее можно принять за константу. Нулевой компартмент одной стороной граничит с воздухом, следовательно, его температура будет зависеть от динамики температуры последнего.

Для каждого компартмента расчет температуры идет по схеме, представленной на рисунке 40.

Предикторами (входными параметрами) модуля являются: процентное содержание X_m и теплоемкость C_m минералов и органического вещества, входящих в состав почвы, плотность P_s , влажность W_s и температура T_s почвы на начало расчета. Значения этих параметров подаются на вход. После этого начинают работать уравнения, описывающие процессы, происходящие внутри почвы. На основании X_m и C_m вычисляется удельная теплоемкость почвенного скелета C_s , которая, совместно с P_s и W_s , входит в функцию расчета объемной теплоемкости почвы C . Последняя, а также P_s и W_s , определяют теплопроводность, то есть скорость обмена теплом между соседними компартментами L .

Рассчитав значения C и L с учетом исходной температуры T_s , вычисляется температура каждого слоя почвы на следующий шаг модели (следующий час).

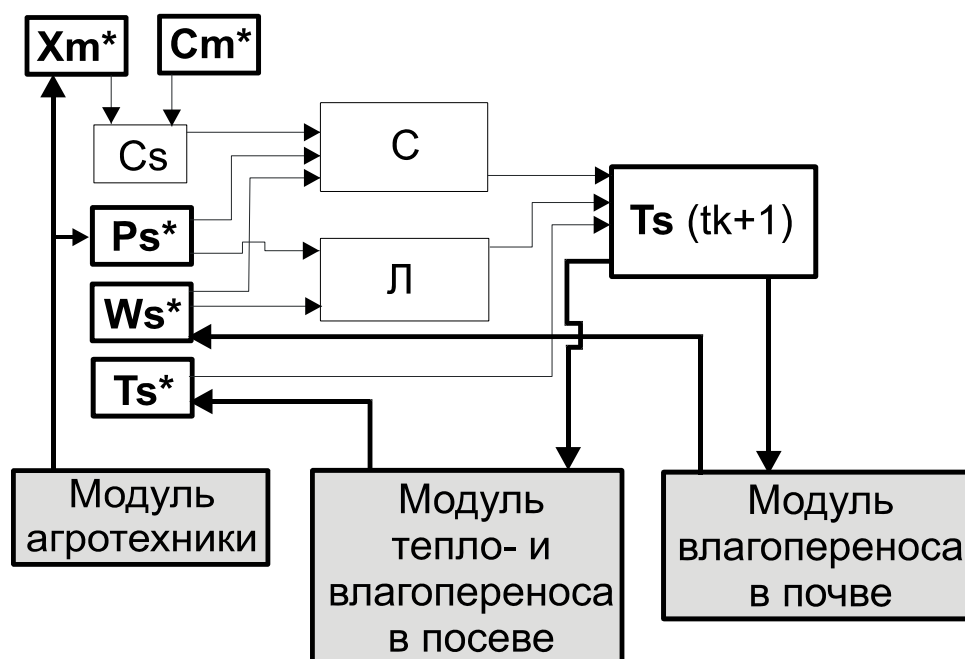


Рис. 40. Структурная схема модуля теплопереноса в почве:

→ — внешние связи; → — внутренние связи;

* — предикторы модуля

Верификация (проверка) работы модели проводилась для конкретных условий стационарной площадки Костромской агрометеорологической станции. С этой целью взяты значения входных параметров на 6 часов 18 мая 1994 года, по которым и рассчитывалась температура почвенных компартментов на 12 и 18 часов этих же суток.

Для работы модели вводили:

- 1) начальную температуру всех компартментов на 6 часов 18.05.94 г.;
- 2) удельную теплоемкость почвенного скелета всех компартментов (среднее для дерново-подзолистой супесчаной почвы);
- 3) плотность почвы, г/см³, всех компартментов (по результатам анализа почвенного разреза);
- 4) влажность почвы, %, всех компартментов на 18.05.94 г.;
- 5) температуру на поверхности почвы (по запросу программы с интервалом 1 ч, учитывая фактическую температуру на 6, 12 и 18 часов 18.05.94 г.).

В результате выполнялся расчет прогноза температуры по горизонтам почвы на следующий час суток. Поскольку температура почвы замерялась только в 6, 12 и 18 часов, а начальная температура компартментов взята на 6 часов, то адекватность работы модели проверяли в два срока: в 12 и 18 часов. Расчетные и фактические данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Проверка адекватности работы модели по данным Костромской агрометеорологической станции (на 18 мая 1994 г.)

Глубина, см	6 часов		12 часов		18 часов	
	Ts-расчетная	Ts-эмпирическая	Ts-расчетная	Ts-эмпирическая	Ts-расчетная	Ts-эмпирическая
0	—	6,2	—	15,5	—	13,7
5	5,3	5,3	14,9	13,9	13,3	12,4
10	6,2	6,2	12,4	11,2	12,6	11,7
20	7,6	7,6	10,8	8,2	11,1	9,3
40	8,9	8,9	8,6	8,4	9,1	9,1
80	6,8	6,8	6,9	6,8	6,9	6,8
120	5,3	5,3	5,4	5,4	5,5	5,4

Отклонение расчетных от фактических данных лежало в пределах 2,6...0,1 °С в 12 часов и 1,8...0,1 °С в 18 часов, а коэффициент корреляции составил, соответственно, 0,97 и 0,98, что говорит о высокой точности работы модели.

Таким образом, на выходе модуля мы получаем рассчитанную по профилю температуру, которую можно использовать автономно (например, изучая зависимость температуры от плотности почвы) или подавать на вход в другие модули модели продукционного процесса, обеспечивая связь между ними.

Некоторые предикторы могут быть выходом с других модулей модели продукционного процесса. Так, температура верхнего слоя почвы может задаваться в виде функции температуры воздуха, то есть являться выходом с модуля теплопереноса в посеве. Аналогично влажность почвенных компартментов, подаваемая на вход рассматриваемого модуля, является выходом с модуля влагопереноса в посеве. Таким образом осуществляется взаимосвязь отдельных модулей в единое целое — *модель продукционного процесса*.

Динамика температуры почвы может довольно активно регулироваться агротехническими воздействиями, так как значения большинства предикторов снимаются с выхода модуля агротехники.

Содержание в почве органического и минерального вещества Хт. Изменение этого предиктора влечет за собой изменение удельной теплоемкости почвенного скелета C_s и через нее — объемной теплоемкости, теплопроводности и температуры почвы. Однако изменение минералогического состава естественных почв — очень дорогостоящее мероприятие и применяется в ограниченных случаях. Таковыми являются: *пескование* глинистых и *глинование* песчаных почв, *известкование* кислых и *гипсование* засоленных. Но эти приемы все же незначительно изменяют теплоемкость, так как для большинства почвенных минералов удельная теплоемкость не превышает 0,2 кал/г·град. Таким образом, самым эффективным приемом является внесение в почву *органического вещества* в виде торфа, навоза, компостов, растительных остатков и других видов органических удобрений. Теплоемкость этих веществ в два раза выше и лежит в пределах 0,40...0,46 кал/г·град. Кроме того, эти вещества регулируют баланс углерода, макро- и микроэлементов, активизируют микробиологическую активность почвы, в целом служат задаче окультуривания пахотного горизонта.

Расчет по формуле удельной теплоемкости почвенного скелета, результаты которого приведены на рисунке 41, показывает, что с увеличением процентного содержания органического вещества, а следовательно, уменьшением минерального, удельная теплоемкость почвы возрастает и, наоборот, обеднение почвы органическим веществом ведет к снижению удельной теплоемкости.

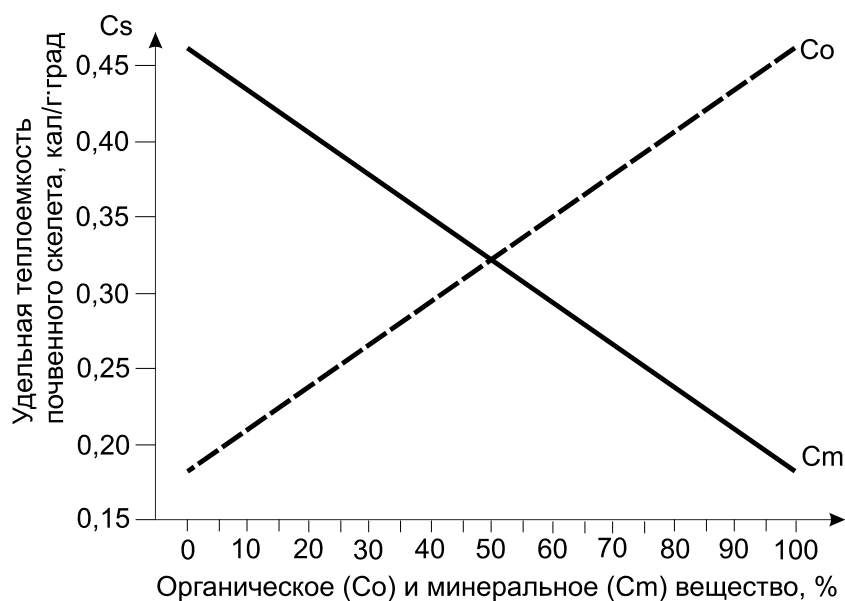


Рис. 41. Зависимость C_s от содержания органического и минерального вещества (при $C_m = 0,175$, $C_o = 0,46$)

Следующий фактор — *плотность почвы* P_s . Почва оказывает сопротивление естественному сжатию и после быстро наступающего предела уже не способна больше уплотняться. Максимальной плотностью почвы можно считать $2,0 \text{ г/см}^3$, так как именно такой величины она достигала в экспериментах (Б.М. Мичурина, 1957) [7] при сжатии почвенного образца давлением порядка 160 атм, что в природе наблюдается очень редко.

Уплотнение почвы — нежелательный процесс для многих сельскохозяйственных культур (например, клубнеплодов и корнеплодов). Поэтому агротехнические воздействия по оптимизации P_s для растений направлены, в основном, на ее снижение. Таким эффектом обладают все (за исключением прикатывания) операции, связанные с обработкой почвы: *вспашка, культивация, дискование, лущение, рыхление, боронование* и др.

В периоды возрастания температуры поверхности почвы (начало вегетационного периода и дневные часы суток) нижние слои обработанной почвы имеют более низкую температуру, чем необработанной. В периоды же охлаждения (конец вегетационного периода и ночное время суток) зависимость обратная (рис. 42). Это связано с пониженной теплопроводностью обработанных слоев почвы.

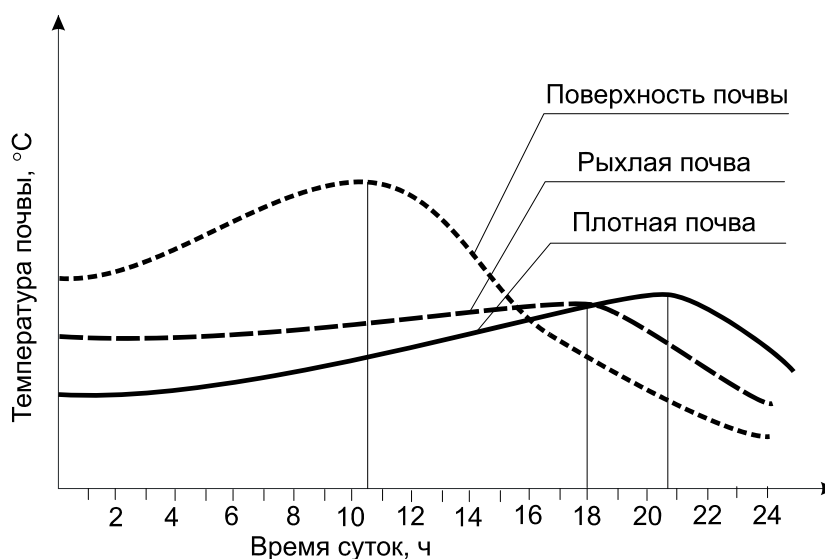


Рис. 42. Динамика температуры почвы в зависимости от обработки

Влажность почвы W_s определяет температуру компартмента (в частности) и всего почвенного профиля (в целом). Регулировать влажность почвы можно в довольно широком диапазоне, однако почти все мероприятия дорогостоящие. Таковыми являются *орошение* и *осушение*, которые относятся к мелиоративному воздействию, приводящему порой к коренному изменению всех или большинства

физико-химических свойств почвы. Водный режим почвы можно регулировать и более дешевыми приемами, которые можно отнести к разряду *агромелиоративных* (нарезка гряд и гребней, лункование и бороздование, кротование и др.), *агротехническими* способами можно регулировать влажность при помощи боронования (весеннее — для закрытия влаги в почве, довсходовое и послеवсходовое) и прикапывания, которое проводится при засухе для восстановления капилляров и поднятия влаги из нижних горизонтов.

4.4. Теплоперенос в посевах

Температура воздуха наземной части экосистемы зависит от теплового излучения почвы и перемещения воздушных масс. При прогревании воздуха теплые массы поднимаются вверх, а на их место поступают холодные. Это так называемый *конвективный перенос*. Но за счет конвекции прогревание воздуха идет очень медленно. Однако, как следует из наблюдений, термический режим наземной части экосистемы изменяется довольно быстро, гораздо быстрее, чем в почве. Это объясняется явлением *турбулентного перемешивания* атмосферы, то есть завихрений воздуха в результате изменения скорости ветра по высоте и препятствий, которые он встречает на своем пути.

Турбулентный обмен идет как над посевам, так и внутри него, но с разной интенсивностью, зависящей от скорости ветра. Сама же скорость ветра затухает по мере приближения к почве из-за сопротивления фитозащитных элементов (рис. 43).

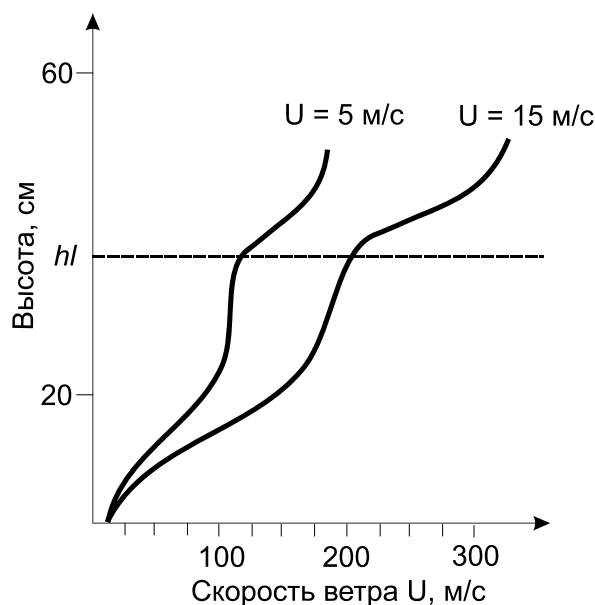


Рис. 43. Динамика скорости ветра внутри посева (по Р.А. Полуэктову)

Ветер влияет на тепло- и влагообмен, а также на обеспечение растений углекислым газом и отвод излишнего кислорода, выделяющегося в процессе фотосинтеза. Поэтому по мере снижения скорости ветра интенсивность этих процессов замедляется, что неблагоприятно сказывается на листьях нижних ярусов и ведет к преждевременному их отмиранию. Как следствие — снижается площадь фотосинтетической поверхности. Таким образом, органы растений верхних ярусов находятся в более благоприятных условиях.

В экосистеме поочередно наблюдается и турбулентное, и конвективное движение воздуха в зависимости от *стратификации* (состояния) атмосферы. Различают *нейтральную, устойчивую и неустойчивую* стратификацию. Нагретый воздух поднимается вверх и при этом расширяется, так как с высотой снижается атмосферное давление. При естественном расширении температура воздуха понижается на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на каждые 100 м высоты. Вокруг поднимающегося столба находятся окружающие его массы воздуха со своей температурой, которая тоже изменяется с высотой. От градиента температур поднимающегося и неподвижного воздуха зависит стратификация атмосферы.

Если температура неподвижного воздуха с высотой уменьшается на $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, поднимающийся воздух, температура которого тоже снижается на $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, беспрепятственно смешивается с окружающим, то стратификация называется *нейтральной* (или *безразличной*) (рис. 44, а). Интенсивность обмена слабая, поскольку восходящего потока воздуха практически нет.

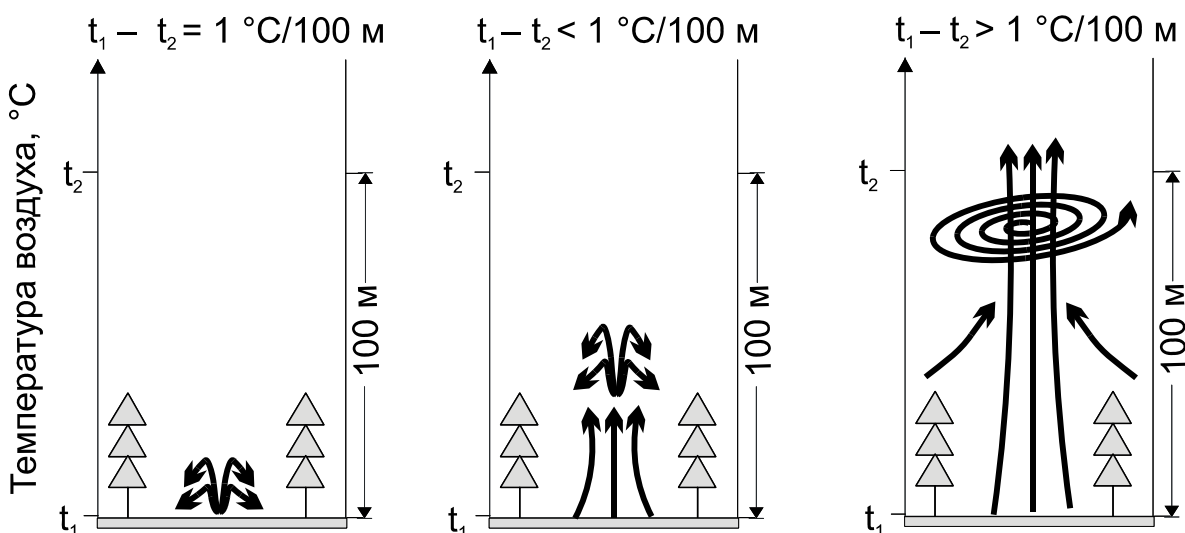


Рис. 44. К понятию стратификации атмосферы:
а — нейтральная; б — устойчивая; с — неустойчивая

Если температура неподвижного воздуха снижается с высотой на величину менее $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, поднимающийся вихрь охлаждается быстрее. Это приводит к его разрушению, а воздух остается в спокойном состоянии, называемом *устойчивой* стратификацией атмосферы (рис. 44, *b*).

Если температура окружающего воздуха снижается с высотой более чем на $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, поднимающийся воздух остается постоянно теплее окружающего. Это ведет к образованию вихрей разной силы. Такое состояние называется *неустойчивая* стратификация (рис. 44, *c*). Завихрения увеличивают тепло- и влагообмен между атмосферой и подстилающей средой в десятки и сотни раз.

Таким образом, термодинамика наземной части экосистемы представляет собою гораздо более сложный процесс, чем термодинамика почвы, поскольку ее модуль должен быть связан с модулем скорости ветра. Так как скорость ветра неодинакова на разной высоте, слой атмосферы надо разделить на компартменты. Большинство выращиваемых культур не превышает по высоте 2 м, следовательно, будем считать эту высоту предельной. Толщину компартментов целесообразно установить 10 см, что позволит более точно рассчитать их параметры в ранние фазы развития растений. Тогда получается 20 компартментов. Схема компартментального распределения приземного слоя воздуха приведена ниже:

Уровень, см	Номер компартмента	Высота компартмента, см
200	20	10
190	19	10
180	18	10
170	17	10
160	16	10
150	15	10
140	14	10
130	13	10
120	12	10
110	11	10
100	10	10
90	9	10
80	8	10
70	7	10
60	6	10
50	5	10
40	4	10
30	3	10
20	2	10
10	1	10
0	0	0

Для расчета температурного режима атмосферы вводятся следующие параметры: плотность атмосферы P_a ; теплоемкость воздуха при постоянном давлении C_p ; высота растений hl ; листовой индекс компартмента L ; скорость ветра на высоте флюгера U_f ; температура поверхности почвы T_s и интегральная радиация Q_o (рис. 45).

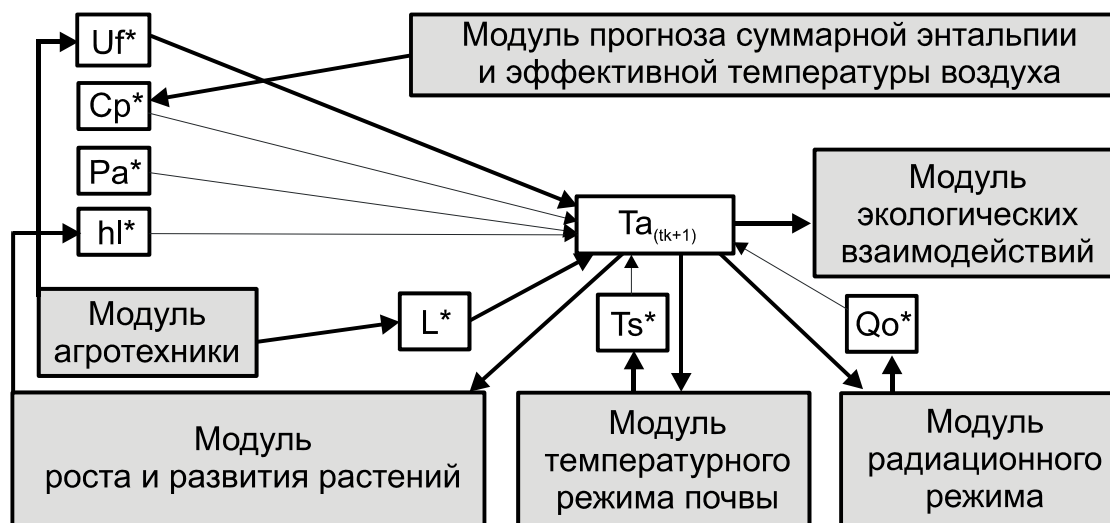


Рис. 45. Структурная схема модуля температурного режима атмосферы

В свою очередь, температура воздуха компартментов на следующий шаг модуля теплопереноса $Ta_{(tk+1)}$ используется в модулях: температура почвы, радиационный режим посева, рост и развитие растений.

Температуру воздуха в полевых условиях можно регулировать агротехническими способами только через три параметра: скорость ветра U_f , высоту посева hl и листовой индекс L . Контролировать скорость ветра можно при помощи регулирования высоты посева hl , которая определяется *видом* и *сортом* возделываемой культуры, а также *уровнем минерального питания* (особенно азотного, которое действует на ростовые процессы). Высота посева и листовой индекс регулируются подбором *вида культуры, сорта и объема надземной массы*. Последний фактор определяется, в основном, уровнем минерального и углеродного питания.

4.5. Малопараметрическая модель действия температуры на урожайность сельскохозяйственных культур

Под действием вышеописанных процессов динамика температуры воздуха, почвы и листьев изменяется на протяжении суток, так, как это представлено на рисунке 46.

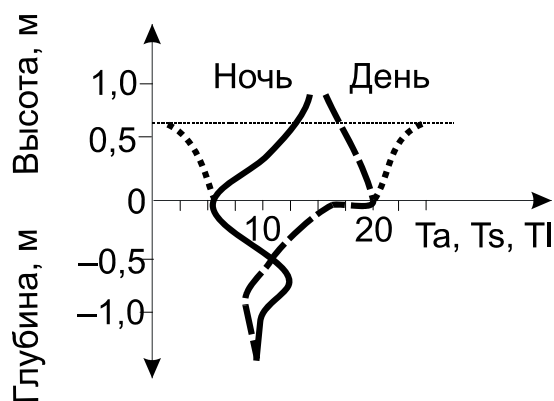


Рис. 46. Суточная динамика температуры воздуха, почвы и листьев (по Р.А. Полуэктову):
 — — — — T_a , T_s (ночь); - - - — T_a , T_s (день); — T_l

Хорошо заметно, что перегреву в дневное время подвергаются, в основном, верхние ярусы листьев. Ночью же температура их ниже температуры воздуха, что приводит к выпадению росы. В дневное время листья от солнечной энергии нагреваются, вместе с этим увеличивается и удельная влажность воздуха в межклетниках, она становится выше таковой в воздухе. Это ведет к открытию устьиц, следствием чего является повышение интенсивности транспирации и в результате — снижение температуры листьев.

Условия теплового баланса ограничивают рост температуры листьев за счет двух процессов:

- 1) роста затрат тепла на транспирацию;
- 2) увеличения теплового излучения листа в окружающее пространство.

Таким образом, процесс нагревания и охлаждения листьев стабилизируется.

В дневное время растения могут испытывать недостаток влаги из-за превышения интенсивности транспирации над корневым поглощением. Это вызывает частичное закрытие устьиц, транспирация снижается или прекращается совсем, что, в свою очередь, ведет к перегреванию листьев, порою приводящему к их гибели.

Таким образом, в полевых условиях температура подвержена довольно значительным колебаниям, часто выходящим за пределы оптимальных значений. Отсюда ясно, что урожайность, обеспечиваемая ресурсами ФАР, в полевых условиях не всегда достигается, поскольку она может лимитироваться тепловым фактором.

Схема малопараметрической модели, изображенная на рисунке 47, представляет собою следующий шаг расчета урожайности сельскохозяйственных культур, учитывающий уровень оптимальности температуры в посеве. Отсюда предикторами модели являются: урожайность 1-го уровня (YQ), температура, при которой начинается фотосинтез растения, и среднесуточная температура воздуха периода вегетации.

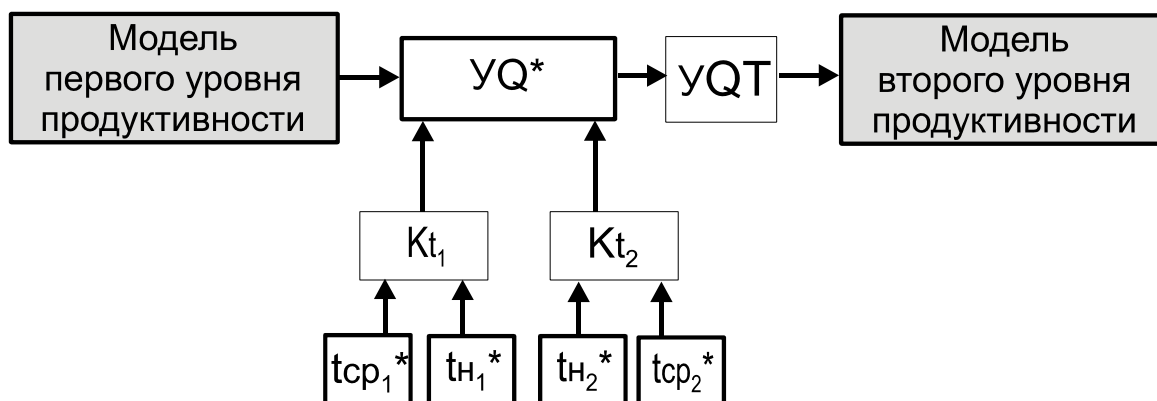


Рис. 47. Структурная схема модуля корректировки продуктивности по оптимальности температуры (ориг.);

→ — внешние связи; → — внутренние связи;

* — предикторы модуля

Минимальная температура, при которой начинается фотосинтез, зависит от вида растения и от его возраста. В принципе, каждая фаза развития должна характеризоваться своей пороговой температурой, но этот вопрос еще недостаточно изучен. Поэтому пока приходится делить период вегетации только на две части, для каждой из которых известна своя пороговая температура: от посева до цветения tn_1 и от цветения до созревания tn_2 (или уборки, если растение скашивается до наступления физиологического созревания). Разница между среднесуточной температурой воздуха за эти периоды (tcp_1 , tcp_2) и пороговой температурой фотосинтеза за эти же периоды используется при расчете значения функций оптимальности (Kt_1 и Kt_2):

$$Kt = a - b (tcp - tn),$$

где Kt — значение функции оптимальности;

a , b — статистические коэффициенты;

tcp — среднесуточная температура воздуха за периоды посев – цветение и цветение – созревание (уборка), °С;

tn — начальная температура фотосинтеза за эти же периоды, °С.

Произведение урожайности, рассчитанной по модели первого уровня продуктивности, на Kt_1 и Kt_2 и будет урожайностью, т/га, скорректированной по оптимальности температуры:

$$Y(Q, T) = Y(Q) Kt_1 Kt_2.$$

Итак, температурный режим экосистемы определяется поступлением коротковолновой и длинноволновой солнечной радиации, причем последняя действует как в дневное, так и в ночное время суток. Днем идет нагревание посева и почвы, ночью — охлаждение. Наибольшей амплитуде колебания температуры подвержены органы верхнего яруса растений. По мере приближения к поверхности почвы и вглубь нее амплитуда температуры уменьшается, а на глубине 0,5...0,6 м суточные колебания затухают.

Температура в экосистеме имеет огромное значение, так как скорость почти всех наблюдающихся процессов зависит от термодинамики атмосферы и почвы. Однако антропогенно изменять этот параметр довольно затруднительно из-за небольшого числа регулируемых факторов. Так, тепловой режим надземной части агроэкосистемы эффективно контролируется только через высоту посева и площадь фитоорганов. На термодинамику почвы можно действовать более эффективно: через изменение содержания органического вещества, влажности и плотности почвы.

В период вегетации может наблюдаться отклонение температуры от оптимального для того или иного растения, что вызовет снижение урожайности на величину, прямо пропорциональную отклонению функции оптимальности температуры от единицы. В связи с тем, что в периоды до и после цветения благоприятная температура роста и развития растения может отличаться, значения функции рассчитываются применительно к каждому периоду в отдельности, а потом проводится корректировка первого уровня продуктивности по оптимальности температурного режима.

Контрольные вопросы

1. Какое значение имеет температура почвы и воздуха для процессов, происходящих в экосистеме?
2. Как происходит поступление и распределение тепла в экосистеме?
3. Какие факторы обеспечивают теплоперенос в почве?
4. Какие факторы обеспечивают теплоперенос в посевах?
5. Принципы и методика разработки малопараметрической модели действия температуры на урожайность сельскохозяйственных культур.

5. ВОДНЫЙ РЕЖИМ АГРОЭКОСИСТЕМ

Для производства биомассы растению требуется определенное количество влаги, которое оно получает из почвы и атмосферы. Недостаток или избыток влаги влечет за собой снижение продуктивности.

Процесс влагопереноса во многом аналогичен теплопереносу, отличия лишь в скорости переноса влаги в почвенных слоях. Влага в почве передвигается настолько медленно, что заметное ее изменение можно зарегистрировать только с интервалом 1 сутки.

5.1. Значение влажности почвы и воздуха в экосистеме

Так же, как солнечная радиация и температура, влага может выступать в качестве внешнего или внутреннего существенных факторов. *Внешним* (экзогенным) фактором она бывает в виде облаков, которые, во-первых, рассеивают прямую солнечную радиацию, а, во-вторых, служат источником капельно-жидкой влаги (осадков). *Внутренним* (эндогенным) фактором влага становится, когда испытывает обратное влияние экосистемы, что наблюдается внутри посева (влажность воздуха) и в корнеобитаемом слое почвы (влажность почвы).

Независимо от направления взаимодействия с экосистемой, вода играет в ее функционировании огромную роль, так как многие процессы прямо или косвенно связаны с той или иной формой воды (рис. 48).

Многие вещества не взаимодействуют, не будучи растворены, а растворителем чаще всего бывает вода. Таким образом, вода выполняет *реакторные функции*, то есть растворяет химические вещества (в том числе и удобрения).

От влажности зависит температурный режим почвы и атмосферы: чем больше влажность, тем выше теплоемкость этих компонентов экосистемы. В свою очередь, от термического режима зависит скорость развития растений. Следовательно, вода выполняет *терморегуляторные функции*.

Особая роль отводится воде как основному компоненту *физиологических функций* организмов. Микроорганизмы, обладающие тонкими клеточными мембранами, практически не могут нормально жить без почвенной влаги. Многие сапрофитные и болезнетворные микроорганизмы (в том числе бактерии и грибы, вызывающие болезни растений) нуждаются в определенной влажности воздуха для роста, питания и размножения. Например, фитофтора картофеля проявляется при повышенной влажности воздуха, а ее зооспоры для распространения требуют капельно-жидкой влаги — росы, дождя, тумана. С другой стороны, для распространения ржавчинных грибов требуется пониженная влажность воздуха, так как их споры могут намокать и терять аэродинамические свойства.

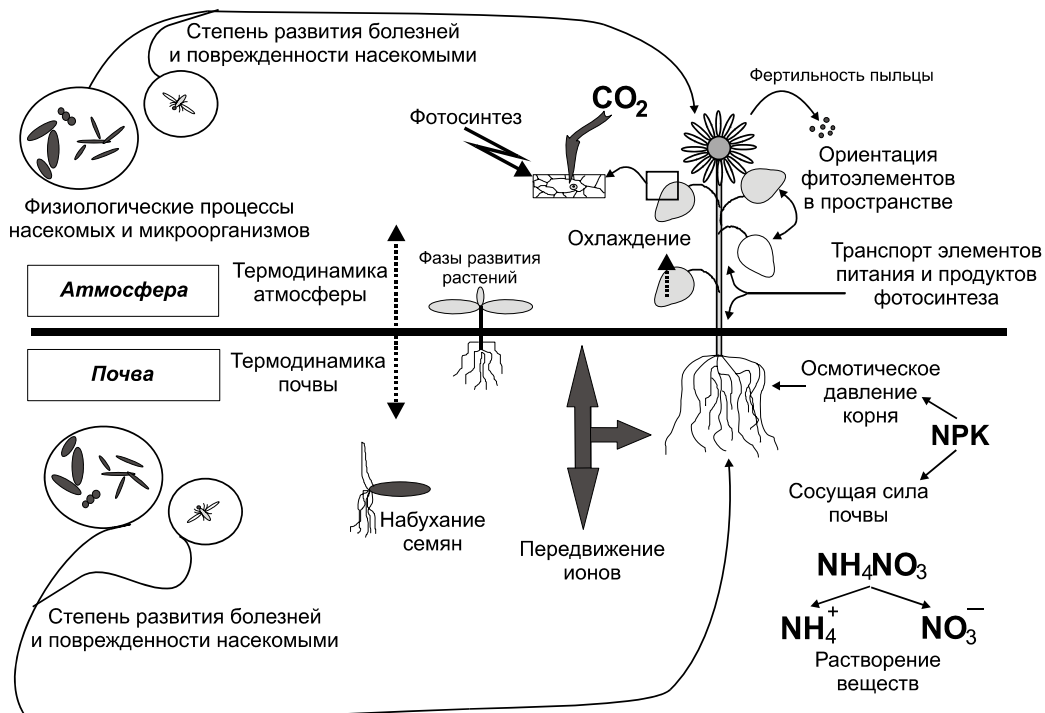


Рис. 48. Связь влаги с процессами экосистемы

Значительна роль воды и для растительноядных насекомых (фитофагов). Эти организмы обычно не могут пользоваться капельно-жидкой влагой. Всю необходимую им жидкость они получают из массы кормового растения. Причем, чем суше окружающий воздух, тем больше им требуется влаги. Поэтому в засушливые годы вредоносность фитофагов резко возрастает.

Решающее значение имеет вода в жизни растения. Главнейший для жизни на Земле процесс — фотосинтез — не может происходить без наличия воды. Другой процесс — транспирация, без которой невозможно охлаждение наземных органов растения и создание сосущей силы корня, а следовательно, и минеральное питание также обеспечивается водой. Газообмен клеток (поглощение углекислого газа и выделение кислорода) обязан присутствию влаги в замыкающих клетках устьиц эпидермиса. Растение стремится расположить свои органы как можно более оптимально как по углу наклона к стеблю, так и по азимуту, а для этого ему требуется поддерживать в клетках состояние тургора, для которого необходима влага. Влажность воздуха действует на жизнеспособность пыльцы: при пониженной или повышенной влажности пыльцевые зерна теряют способность к прорастанию. Для очень важного процесса — набухания семян — требуется 70...250% воды от их массы, поэтому предпосевные приемы обработки почвы направлены, помимо прочего, на сохранение влаги.

От наличия в почве влаги зависит ее водный потенциал (сосущая сила), который возрастает по мере уменьшения влажности почвы и порою достигает значений, при которых невозможно поступление влаги в растение со всеми вытекающими отсюда последствиями нарушения физиологических функций. Скорость передвижения влаги по почвенному профилю определяется коэффициентом влагопроводности, который зависит в первую очередь от водного потенциала.

Вода в экосистеме выполняет и *транспортные функции*, которые могут быть как неблагоприятными, так и полезными. К неблагоприятным относятся: подъем хлоридов из нижних горизонтов почвы в верхние (засоление), вымывание нитратов в грунтовые воды (загрязнение грунтовых вод), перенос на более или менее значительные расстояния частиц почвы (водная эрозия). Но все это — последствия грубого вмешательства человека в функционирование экосистемы.

В естественных условиях с участием воды происходят следующие процессы:

- 1) передвижение ионов по горизонтам почвы и к всасывающим волоскам корневой системы;
- 2) передвижение элементов минерального питания по сосудам ксилемы к различным органам растения;
- 3) перенос ассимилятов по сосудам флоэмы для перераспределения их по органам растения.

Таким образом, значение влаги в экосистеме заключается в выполнении транспортных, терморегуляторных, физиологических и реакторных функций.

5.2. Поступление и распределение влаги в экосистеме

Рассмотрение этого вопроса следует начать с круговорота воды на Земном шаре. Нашу планету, называемую «Земля», правильнее было бы назвать планетой «Вода», так как 2/3 ее поверхности приходится на океаны, моря, реки, озера и многочисленные мелкие водоемы.

Но вся ли эта огромная масса воды используется растением? Конечно, нет. Соленая вода океанов, морей и лиманов практически непригодна для подавляющего большинства видов. Остается незначительное, в масштабах планеты, количество пресной воды, которой и обязана вся жизнь на Земле.

Источниками пресной воды, в первую очередь, являются океаны, с поверхности которых испаряется ежегодно огромная масса воды (рис. 49).

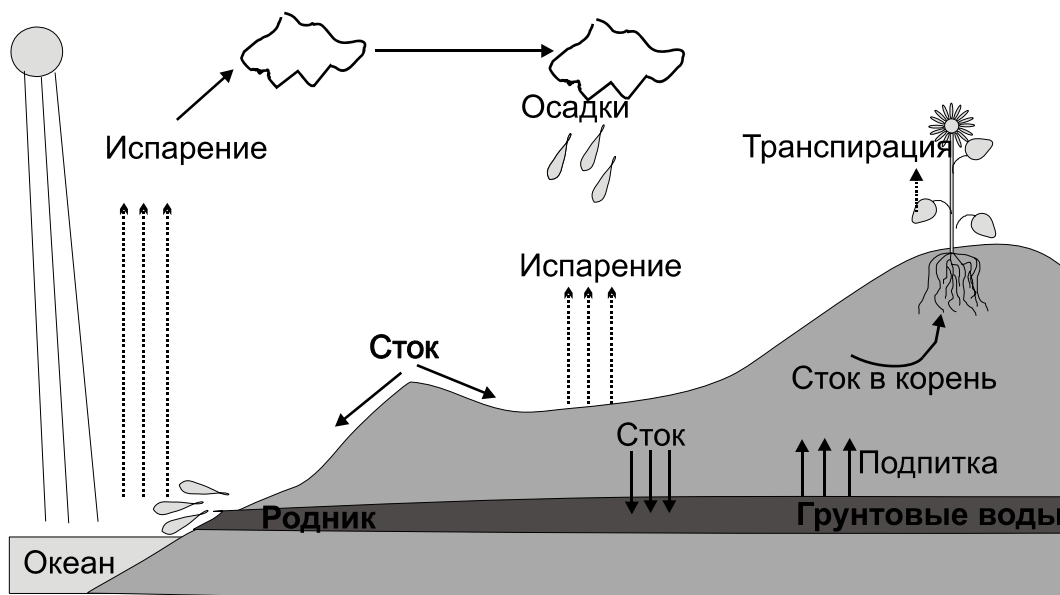


Рис. 49. Круговорот воды на земле

Водяной пар поднимается, конденсируется в верхних холодных слоях атмосферы в виде облаков, которые под действием градиента давления перемещаются из зоны высокого (антициклон) в зону низкого (циклон) давления. Колоссальная работа циклонов и антициклонов приводит к тому, что облака, сформировавшиеся в экваториальной зоне, перемещаются в высокие широты и здесь проливаются дождем.

После того, как капли дождя попали на поверхность почвы, часть их, в зависимости от поглощающей способности почвы, закрепляется в ней, другая — сразу же испаряется с поверхности почвы и таким образом вновь поступает в атмосферу.

Третья часть просачивается в нижние горизонты почвы до влаго непроницаемых слоев (глина, кристаллический фундамент) и стекают по уклону внутри почвы, образуя грунтовые воды, которые могут выходить на поверхность родниками, питающими озера и реки.

Четвертая часть сразу же стекает по уклону либо по поверхности, либо внутри верхнего слоя, часто вызывая водную эрозию. Это явление наблюдается при сильном переувлажнении и хорошо известно по весенним паводкам и последствиям ливневых дождей.

Наконец, пятая часть поглощается растениями и идет на формирование биомассы.

Влага, оставшаяся в экосистеме, перераспределяется так, как показано на рисунке 50. Всю влагу в экосистеме можно разделить на атмосферную, почвенную и растительную. Конечно, есть еще и зоологическая, то есть влага, содержащаяся в животных и микроор-

ганизмах, но количество ее так незначительно, что ею можно пренебречь. Влага, содержащаяся в растениях, не является первичной, так как они получают ее из почвы и атмосферы. Таким образом, остаются два блока: почвенный и атмосферный, перенос влаги в которых будет изложен несколько позже. Теперь же посмотрим на движение влаги, так сказать, «крупным планом».

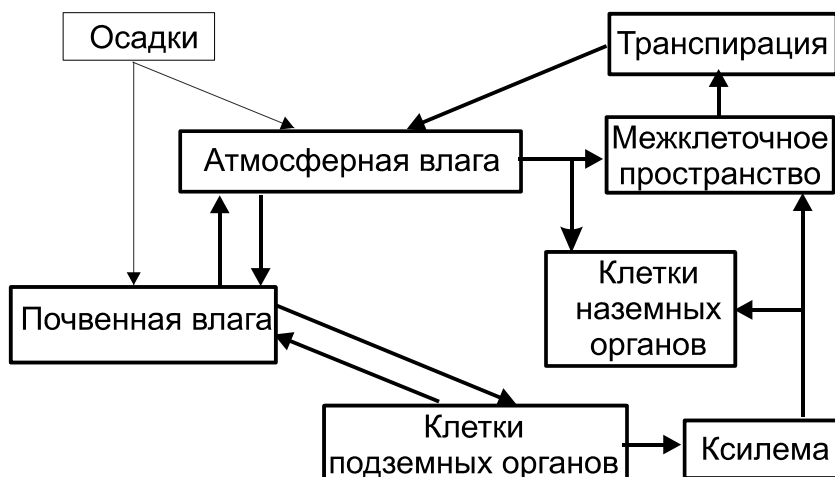


Рис. 50. Перенос влаги в системе «почва – растение – атмосфера»

В большинстве наземных экосистем главный источник влаги почвы и воздуха — осадки. Осадки могут быть в виде дождя, тумана, росы, снега, града. С некоторым приближением к осадкам можно отнести различные виды орошения.

Независимо от естественного или искусственного происхождения осадков, они пополняют запас атмосферной и почвенной влаги и перераспределяются в них. Так, часть атмосферной влаги при понижении температуры до точки росы конденсируется на поверхности растений и почвы и таким образом поглощается ими. В свою очередь, влага с поверхности почвы испаряется и переносится вместе с токами воздуха по компартментам травостоя, причем закономерности распределения влаги внутри посева аналогичны переносу тепла. Почвенное испарение имеет значение на открытой почве, что в агроэкосистемах наблюдается до появления всходов. Это считается непродуктивной потерей влаги, для уменьшения которой применяют целый набор приемов, связанных, в первую очередь, с обработкой почвы. Если же присутствует растительность, то интенсивность испарения снижается до незначительной. Но зато на смену приходит потребление почвенной влаги растениями, которое, в основном, считается продуктивным, хотя много воды уходит на транспирацию.

Поступление влаги в растение идет по двум направлениям: непосредственно из атмосферы и из почвы. Атмосферная влага, задерживаясь на листьях, поглощается клетками растений или поступает через устьица в межклетники. Это приходная статья водного баланса растений обычно незначительна, хотя у отдельных групп растений (ксерофиты) является ведущей. Тем не менее, явление это можно использовать и его используют при управлении агроэкосистемами, когда опрыскивают посевы растворами минеральных удобрений и микроэлементов (некорневые подкормки), а также средствами химической защиты системного действия (эти группы препаратов проникают в растение и передвигаются по сосудам в различные органы).

Основное количество влаги растения все же получают из почвы через специализированные органы — корни. Влага, а вместе с ней различные элементы минерального питания и физиологически активные вещества, всасываются в корневые волоски, поступают в сосуды ксилемы и распределяются следующим образом:

- 1) остаются в клетках корня для поддержания его в тургорном состоянии и обеспечения физиологических функций;
- 2) запасаются в специально приспособленных для этого органах (корневищах, клубнях, луковицах, корневой шейке, утолщенных корнях, стеблях и листьях);
- 3) поступают в наземные органы для выполнения физиологических функций;
- 4) по сосудам ксилемы вода передвигается в межклеточные пространства, подходит к устьицам и испаряется через них в атмосферу, то есть расходуется на транспирацию.

На транспирацию растение использует во много раз больше воды, чем на формирование биомассы. Усиленное испарение может вызвать завядание из-за недостатка влаги. Тем не менее, транспирация растению необходима: во-первых, для охлаждения листьев и, во-вторых — для обеспечения необходимой сосущей силы корней. Таким образом, растения балансируют «на лезвии ножа»: с одной стороны, испарение вызывает нарушение физиологических функций и приводит к непродуктивным затратам энергии, а, с другой стороны, без транспирации и листья перегреются, и корни перестанут поглощать элементы питания.

Следует отметить, что растения не только поглощают воду из почвы, но могут и выделять некоторую ее часть в виде растворов различных веществ. Например, некоторые физиологически активные вещества, образующиеся в клетках или находящиеся в межклеточных

пространствах, переносятся по сосудам ксилемы в корни и затем выделяются в окружающее их пространство. За счет корневых выделений формируется ризосферная микрофлора, специфичная для каждого вида растений, эти же корневые выделения активно влияют на другие растения того же или другого вида. Такое взаимодействие называется *аллелопатия* и будет рассмотрено в специальной главе.

Корни могут выделять взятую из глубоких почвенных горизонтов влагу в верхние, где расположена основная корневая масса. Некоторые растения (люцерна, в меньшей степени клевер) выделяют в ризосферу вместе с водой катионы кальция, обеспечивая тем самым снижение почвенной кислотности.

5.3. Влагоперенос в почве

Баланс влаги в почве складывается из двух взаимно противоположных процессов: *промачивания* и *иссушения*. Поступление влаги (промачивание) зависит от атмосферных осадков, конденсации на биомассе влаги из окружающего воздуха (роса), стока с вышерасположенных участков, капиллярного подъема из грунтовых вод, искусственного орошения и поливов. Однако все эти факторы действуют непродолжительное время и нерегулярно. Поэтому для растения гораздо важнее режим иссушения, который действует на протяжении почти всего вегетационного периода.

Процесс движения влаги в почве во многом аналогичен переносу температуры, да и сама температура зависит от влажности почвы. Еще надо отметить, что запас влаги в корнеобитаемом, а тем более в метровом слое почвы, который учитывается многими моделями, довольно далек от реального водопотребления растений. Так, в начальный период роста основное значение имеет влага, содержащаяся в слое почвы 0-5 см и только по мере проникновения корней вглубь начинают активно использоваться запасы влаги глубоких горизонтов. Следовательно, для повышения точности работы модели необходимо разбить почвенную часть экосистемы на отдельные слои (компарменты) и рассчитывать влажность каждого слоя отдельно. Однако надо учитывать связь температуры с влажностью, что позволит соединить оба модуля. Следовательно, толщина почвенных слоев для расчета влажности должна соответствовать таковой для температуры (рис. 51). Распределение корневой системы тоже должно соответствовать этим слоям, что позволит подключить модуль динамики роста корневой системы.

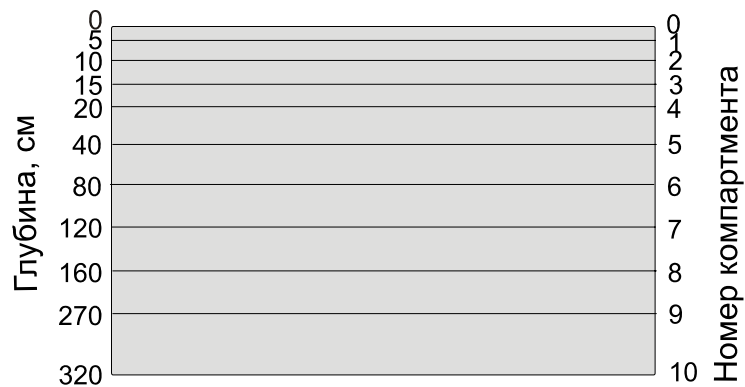


Рис. 51. Схема почвенных компартментов для расчета динамики влажности почвы

На вход базового модуля влагопереноса в почве подаются следующие параметры: количество и интенсивность атмосферных осадков O_a , интенсивность транспирации E и исходная влажность почвенных слоев W_s (рис. 52). Если почва не покрыта растительностью, этого будет достаточно, чтобы рассчитать влажность каждого компартамента почвы на следующий шаг расчета, который для влаги составляет 24 часа.

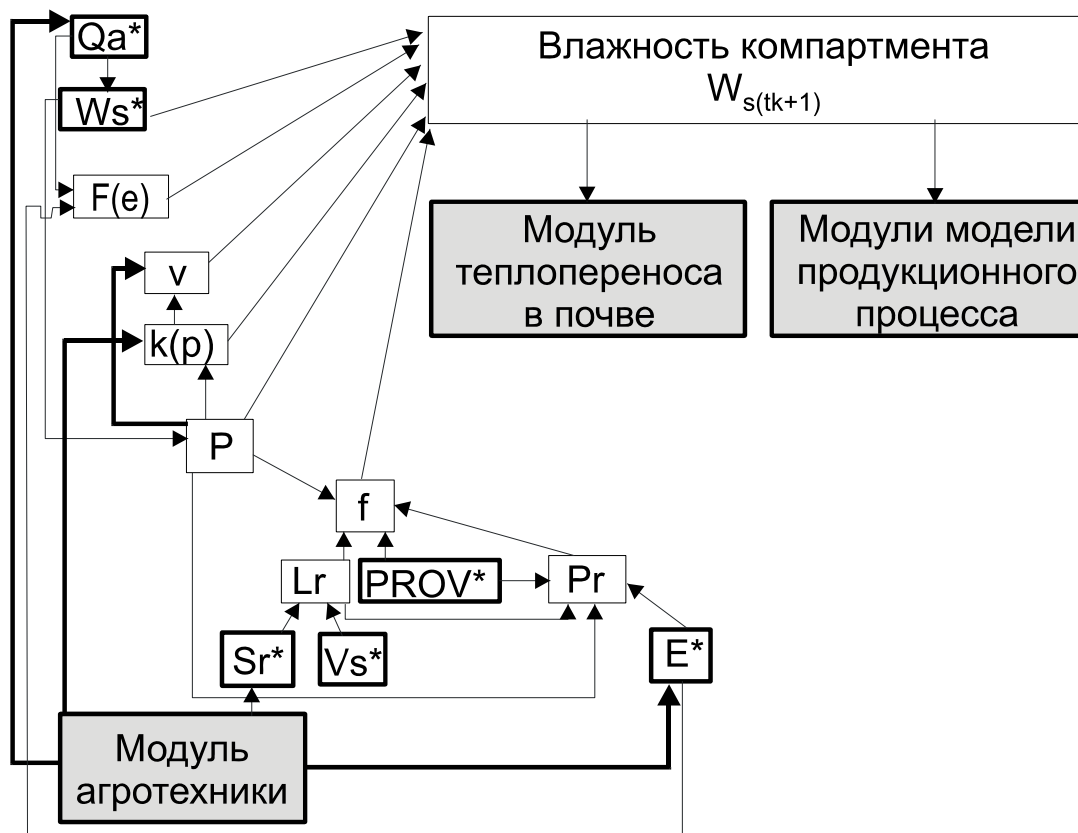


Рис. 52. Структура модуля влагопереноса в почве:
 ————— — внешние связи; ————— — внутренние связи;
 * — предикторы модуля

Во время выпадения осадков влажность почвы повышается. Сухая почва начинает впитывать влагу, поскольку она обладает определенной влагоемкостью. Сила, которая обеспечивает поглощение капельно-жидкой влаги почвенных агрегатов, называется *сосущей силой почвы* (или *водным потенциалом*) P , который изменяется в зависимости от количества влаги в почве. Когда влажность верхнего слоя почвы возрастает настолько, что он не может ее удержать ($P = 0$), вода под действием *гравитационной силы* g и *водного потенциала* нижних горизонтов перемещается с определенной скоростью v вниз и промачивает глубинные компартменты. Сама скорость передвижения влаги зависит не только от водного потенциала, но и от *коэффициента влагопроводности* $k(p)$, который, в свою очередь, сам является функцией от водного потенциала. Таким образом, в режиме промачивания почвы влага передвигается сверху вниз под действием гравитации и водного потенциала нижних горизонтов (рис. 53, а).

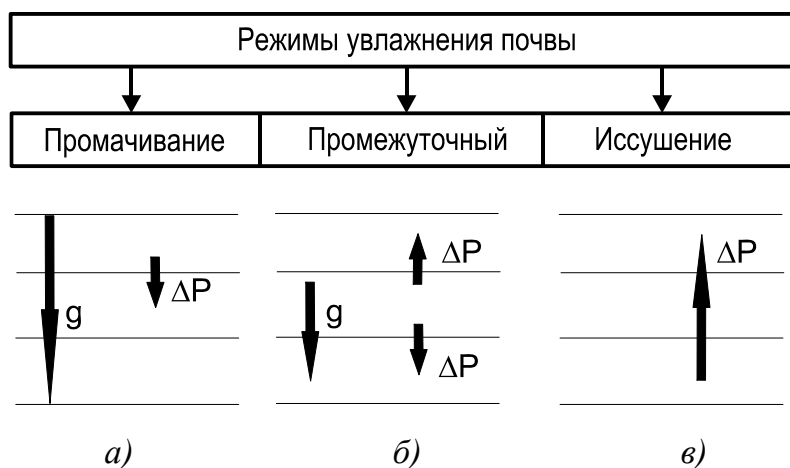


Рис. 53. Направление действия движущих сил влагопереноса в почве

Сразу после окончания дождя длинноволновая солнечная радиация начинает нагревать поверхность почвы. Нагретая почва испаряет влагу, то есть функция водного баланса принимает отрицательное значение за счет усиления транспирации (для почвы ее называют обычно «испарение»). Следовательно, начинается иссушение. Влага будет передвигаться к более сухим слоям, то есть некоторое время после дождя влага за счет инерции двигается вниз (см. рис. 53, б), но уже начинают работать силы, заставляющие двигаться ее вверх. Дело в том, что почва пронизана разного диаметра капиллярами, которые оканчиваются на ее поверхности. Следова-

тельно, если верхние слои подсыхают, потенциал их повышается и это заставляет влагу двигаться в направлении градиента (разницы) водного потенциала снизу вверх (см. рис. 53, в). Таким образом, в режиме иссушения почвы влага передвигается снизу вверх под действием водного потенциала верхних горизонтов. Следует помнить, что капиллярный подъем влаги действует против гравитационной силы, всегда направленной вниз, поэтому коэффициент влагопроводности уменьшается по сравнению с таковым при движении снизу вверх. Это явление получило название «гистерезис» и обязательно должно учитываться при построении модели влагопереноса в почве.

Следовательно, скорость обмена влагой между почвенными компартментами зависит от градиента их водного потенциала и коэффициента влагопроводности. Эти два параметра настолько важны, что их следует рассмотреть несколько подробнее.

Водный потенциал (или «давление» почвенной влаги) — это величина отрицательная и измеряется в гектопаскалях, атмосферах или сантиметрах водного столба. При уменьшении влажности он увеличивается по абсолютной величине, а при достижении полной влагоемкости обращается в ноль (рис. 54).

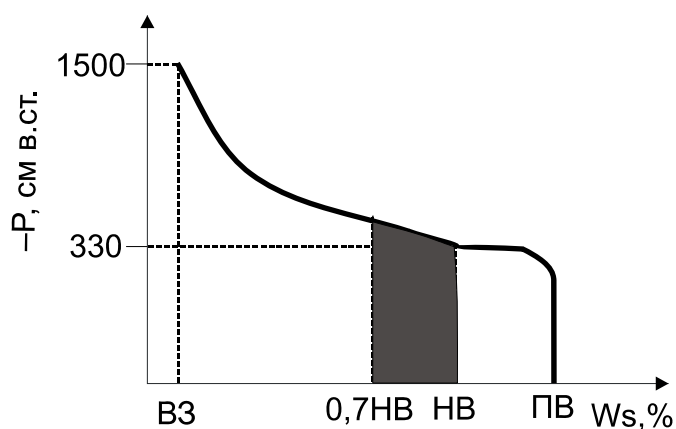


Рис. 54. Кривая водоудерживающей способности почв (по Р.А. Полуэктову)

Графическое изображение функции зависимости водного потенциала от влажности называется *кривой водоудерживания* (или *основной гидрофизической характеристикой ОГХ*) почвы. Согласно графику, водный потенциал изменяется от 0 до более чем 15 000 см вод. ст. в интервале влажности от влажности завядания ВЗ до полной влагоемкости ПВ. Как влажность завядания, так и полная влагоемкость неблагоприятно влияют на рост растений.

При *ПВ* почва настолько насыщена влагой, что в ней почти не остается воздуха. В результате корни испытывают кислородное голодание. Наоборот, при *ВЗ*, которой соответствует водный потенциал 15 000 см. вод. ст., растения испытывают недостаток воды, так как все почвенные поры заполнены воздухом. И в том и в другом случае создаются экстремальные условия, вызывающие нарушения физиологических процессов в клетках растения.

Оптимальные условия создаются после стока излишней влаги, то есть при потенциале 330 см вод. ст. Такая влажность почвы называется наименьшей влагоемкостью *НВ*. В этом случае в почве достаточно и воды и воздуха.

Надо сказать, что и *ВЗ*, и *НВ*, и *ПВ* — это довольно относительные величины, специфичные для каждого типа и гранулометрического состава почвы и для каждой культуры. Так, например, *ПВ* у почв высокогумусированных, с высоким содержанием органики гораздо выше, чем у почв преимущественно минерального состава. Следовательно, относительные величины использовать в базовых моделях затруднительно. Вот поэтому при составлении универсальной модели целесообразно пользоваться процентным содержанием влаги в почве и уже от этого показателя рассчитывать водный потенциал.

Следующий показатель, характеризующий водный режим почвы, — *коэффициент влагопроводности*. При полном насыщении почвы влагой он называется *коэффициентом фильтрации*. Этот показатель обратно зависит от водного потенциала: с увеличением абсолютной величины последнего влагопроводность уменьшается.

Коэффициент влагопроводности характеризует скорость движения влаги в почве и измеряется в см/с. Линия, характеризующая зависимость влагопроводности от влажности, определяется минералогическим составом почв, а также их плотностью, содержанием органических веществ, историей почвообразовательного процесса. На рисунке 55 изображена зависимость коэффициента влагопроводности от водного потенциала. С увеличением водного потенциала песка проводимость его для влаги уменьшается и при давлении более 10 000 см вод. ст. приближается к нулю. Для глины этот показатель меняется очень мало, то есть глина плохо проводит воду, что и объясняет ее использование для герметизации подвальных и других заглубленных помещений, где нежелательно присутствие воды.

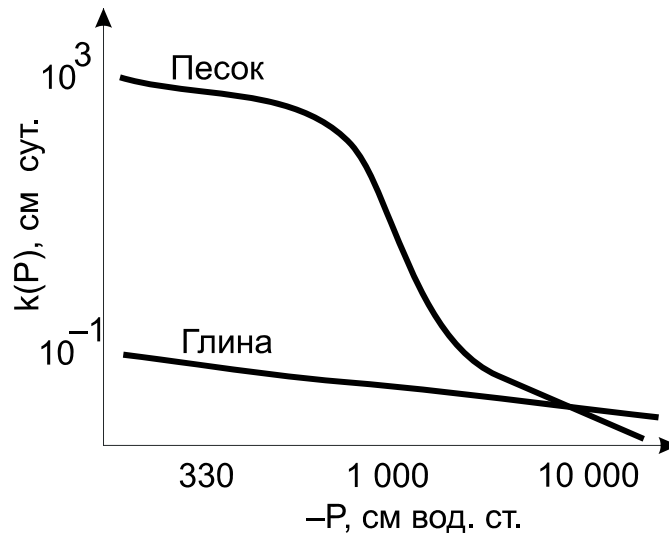


Рис. 55. Зависимость коэффициента влагопроводности $k(P)$ от водного потенциала P (по Р.А. Полуэктову)

Если почва покрыта растительностью, то почвенное испарение приближается к нулю в зависимости от площади проективного покрытия фитоэлементами. Так, при 100%-ном покрытии испарение из почвы столь мало, что в расчетах им можно пренебречь. Тем не менее, почва все же теряет влагу за счет транспирации растениями.

Поглощение влаги корневой системой идет в первую очередь из тех горизонтов, которых достигли корни. Следовательно, модель должна учитывать скорость роста корневой системы и площадь ее S_r в определенном объеме почвы V_s . Скорость передвижения воды по сосудам зависит от температуры в данном слое почвы, а также от таксономического вида растения. Направление поглощения (в корень или из корня) зависит от разности потенциалов корня P_r и почвы P . Если потенциал корня по абсолютному значению превышает потенциал почвы, вода поступает в корневую систему и передвигается к наземной биомассе. По пути может встретиться слой почвы, по водному потенциалу выше того же параметра корня. В таком случае часть воды поступает из корня в прилегающий слой почвы, увлажняя его. Для учета корневого поглощения вычисляется функция стока воды в корень f (см. рис. 52), для получения которой необходимо ввести значения: транспирации E , площади корней S_r , их проводимости $PROV$ и объема компартмента V_s . Зная S_r и V_s , нетрудно вычислить корневой индекс L_r , то есть количество корней в единице объема почвы. Естественно, чем больше количество корней в почве и чем выше их проводимость и сосущая сила, тем быстрее влага перемещается из почвы в растение и, через его посредство, — в атмосферу.

Итак, влажность почвы на следующий шаг модели $W_{S(tk+1)}$ — это функция от $W_{S(tk)}$, $F(E)$, v , $k(p)$, P , f . Поскольку влагоперенос в почве относится к процессам средней скорости, шаг модели для расчета составляет 24 часа, то есть распределение влаги по слоям, поданное на вход модуля теплопереноса в почве, используется последним 24 раза, по истечении которых влажность пересчитывается и цикл повторяется.

Водный режим почвы можно регулировать агротехническими способами через действие на атмосферные осадки, коэффициент влагопроводности, площадь корневой системы и транспирацию растений.

Атмосферные осадки в полевых условиях регулируются с трудом и значительными материальными затратами. Чаще всего дополнительное поступление влаги обеспечивается поливом (орошение напуском, дождевание, полив по бороздам и др.) и снегозадержанием в малоснежных районах.

Коэффициент влагопроводности зависит не только от водного потенциала, но и от плотности почвы. Чем более она оструктурена, тем больше ее влагопроводность. Плотность почвы регулируется почвообрабатывающими орудиями во время выполнения операций, подробно изложенных в главе 4.

Регулировать влажность почвы можно и через действие на растение, в частности, на площадь корневой системы. Чем больше площадь корней в слое почвы, тем выше их общее потребление влаги, то есть почва быстрее иссушается. Поэтому, чем засушливее зона, тем меньше норма высева культурных растений. И наоборот, на переувлажненных почвах высеваются влаголюбивые культуры с высоким коэффициентом транспирации, что значительно понижает уровень грунтовых вод. Например, болота Колхиды были осушены с помощью завезенных из Австралии эвкалиптов, корневая система которых исключительно быстро всасывает воду. Многокомпонентные смеси культур рекомендуется подбирать таким образом, чтоб основная масса корней размещалась у разных видов на разной глубине, что позволяет более рационально использовать ресурсы влаги.

Обычно в агроэкосистемах растения периодически испытывают недостаток влаги, вызывающий водный стресс и, как следствие, снижение фотосинтетической активности, ведущее к недобору биомассы. Здесь должна помочь *селекция*, направленная на получение сортов с пониженным *транспирационным коэффициентом*. Это позволит снизить непродуктивные потери воды на испарение.

5.4. Влагоперенос в посеве

Запасы влаги, содержащиеся в поступающих к экосистеме воздушных массах, постоянно пополняются за счет эвапотранспирации. Если бы происходил только конвективный перенос за счет разности концентрации влаги в наземных слоях, влагообмен шел бы очень медленно. Однако эмпирически установлено, что динамика влаги — это быстрый процесс, так как водяные пары перемещаются в глубине посева под влиянием турбулентного перемешивания воздуха, которое одновременно осуществляет и теплообмен. Влагообмен, так же, как и теплообмен, зависит от скорости ветра. Таким образом, можно связать модули теплопереноса и влагопереноса в почве через коэффициент турбулентного обмена количества движения ku (рис. 56).

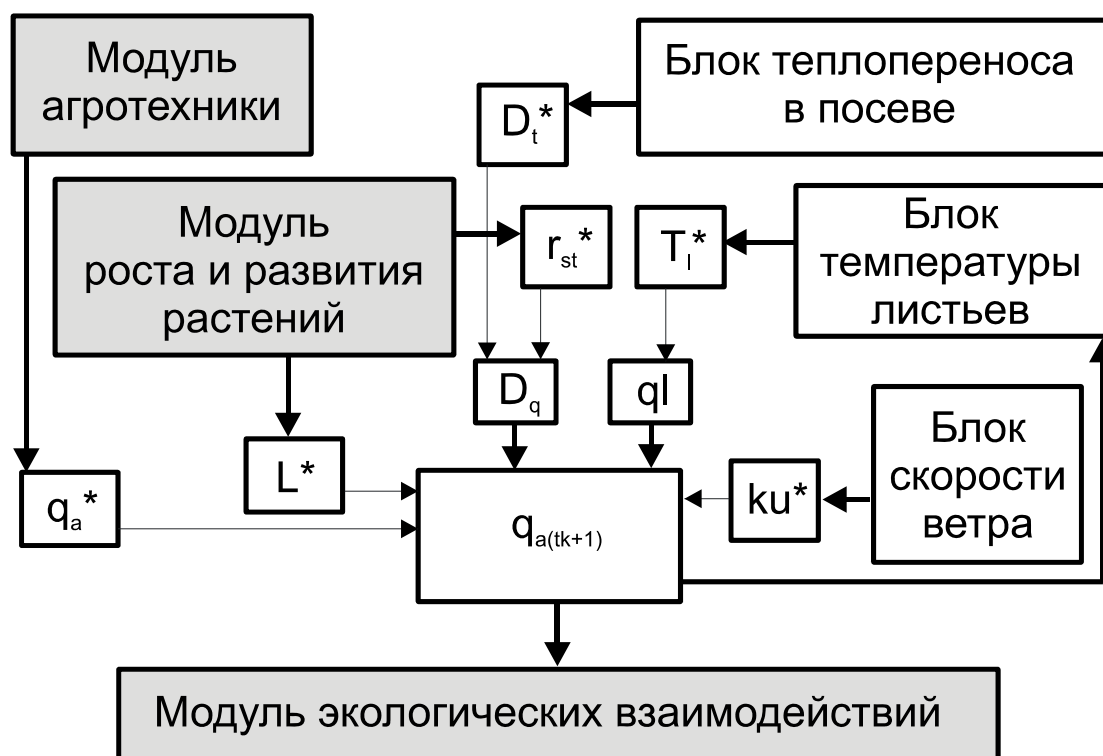


Рис. 56. Структурная схема блока влагопереноса модуля тепло- и влагопереноса в посеве:

— — внешние связи; — — внутренние связи;
* — предикторы модуля

Исходными параметрами, от которых зависит влажность воздуха в наземных компартментах, являются: температура листьев T_l , листовой индекс L , проводимость прилистного слоя воздуха для тепла D_t и сопротивление устьиц r_{st} . По величине D_t и r_{st} рассчитывается суммарная проводимость паров воды в прилистном слое воздуха D_q , а по T_l —

удельная влажность воздуха в межклетнике q_l . Для расчета влажности воздуха в компартменте на следующий час суток $q_{a(tk+1)}$, которая используется модулем экологических взаимодействий, необходимо задать исходную величину его влажности q_a .

Способы регулирования влажности воздуха направлены на изменение листового индекса L и влажности воздуха q_a .

Основным поставщиком влаги в посевах являются растения, точнее, устьичные щели, через которые связывается влага почвы и влага атмосферы. Но растение не может испарять в неограниченном количестве, так как устьичная щель имеет определенное сопротивление движению воздуха, а вместе с ним и водяных паров, которое уменьшается по мере открытия устьиц.

На сопротивление устьиц влияет радиационный баланс посева (в темноте устьица закрываются) и водный потенциал листа (при водном дефиците устьица закрыты). Кроме того, определенное действие оказывает и температура листа, как фактор, зависящий от радиационного баланса.

Ночью температура листьев ниже температуры воздуха, а удельная влажность воздуха близка к насыщению. Это приводит к выпадению росы. В дневные часы листья от солнечной энергии нагреваются. Вместе с ростом температуры увеличивается влажность в межклеточном пространстве паренхимы. Это приводит к уменьшению устьичного сопротивления, а следовательно, к интенсивной транспирации. Процесс транспирации мог бы идти до бесконечности, но его ограничивает рост затрат тепла и увеличение теплового излучения листа в окружающее пространство. В полуденные часы при недостатке влаги может быть депрессия испарения за счет частичного закрытия устьиц из-за обезвоживания тканей листа, что, в свою очередь, приводит к депрессии фотосинтеза, без которого накопление биомассы невозможно.

5.5. Малопараметрическая модель действия влаги на урожайность сельскохозяйственных культур

Разработка базовой модели 2-го уровня продуктивности достаточно сложна, равно как и ее использование в повседневной практике. Поэтому для расчетов, не требующих большой точности и допускающих погрешность 15...25%, можно пользоваться малопараметрической моделью, структурная схема которой представлена на рисунке 57.

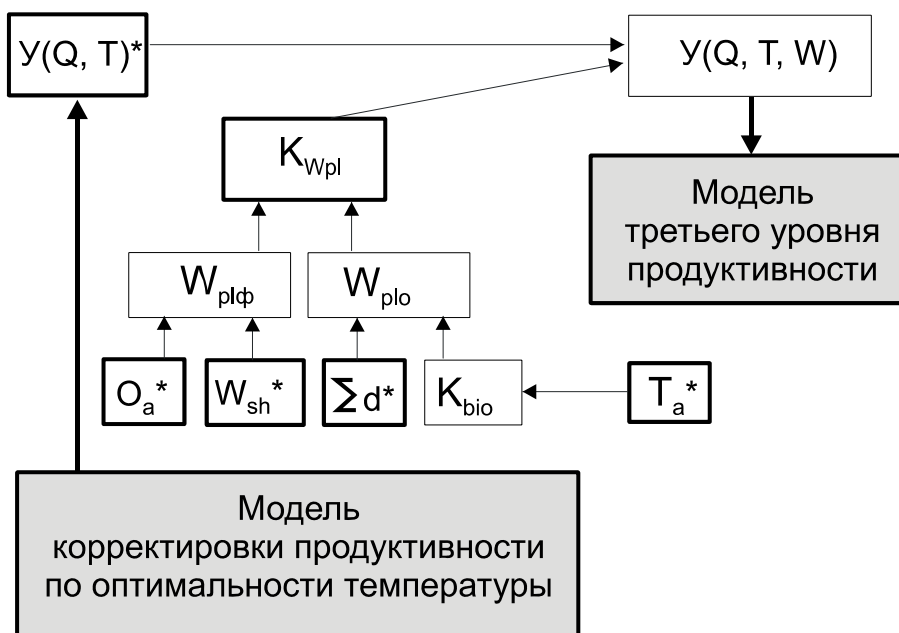


Рис. 57. Структурная схема модели 2-го уровня продуктивности (ориг.):

→ — внешние связи; ————— — внутренние связи;
* — предикторы модуля

На вход модели подаются: сумма осадков, выпавших за вегетационный период (O_a , мм); запас влаги в корнеобитаемом слое почвы на начало вегетации (W_{sh} , мм); сумма дефицитов влажности воздуха за период вегетации (Σd , мбар); средняя за вегетацию температура воздуха (T_a , °C); урожайность, рассчитанная по модели 1-го уровня продуктивности и скорректированная по оптимальности температуры $Y(Q, T)$, т/га.

Выходом служит урожайность второго уровня продуктивности $Y(Q, T, W)$, т/га, которая будет использована как входной параметр модели третьего уровня продуктивности.

Для расчета величины урожайности в зависимости от влагообеспеченности применяется производственная функция А.С. Образцова [4]:

$$Y(Q, T, W) = Y(Q, T)K_w.$$

Здесь надо вычислить функцию оптимальности увлажнения K_w , которая в общем виде является отношением фактической влагообеспеченности растения $W_{pl\phi}$, мм, к оптимальной W_{plo} , мм, и рассчитывается по формуле

$$K_w = \frac{W_{pl\phi}}{W_{plo}} + \left(\frac{W_{pl\phi}}{W_{plo}} \right)^3 - \left(\frac{W_{pl\phi}}{W_{plo}} \right)^4.$$

Величина W_{plf} рассчитывается по сокращенному уравнению водного баланса, для которого задаются W_{sh} — запасы влаги в корнеобитаемом слое почвы на начало вегетации, мм; O_a — сумма осадков за учитываемый период вегетации, мм. Эти входные параметры задаются или по прогнозу, или по фактическим наблюдениям.

Оптимальное водопотребление можно определить по общепринятой формуле Алпатьева:

$$W_{plo} = R_{bio} \Sigma d,$$

где R_{bio} — биоклиматический коэффициент;

Σd — сумма дефицитов влажности воздуха, мбар.

Биоклиматический коэффициент приближенно определяется по формуле

$$R_{bio} = (1 - k_{mk} Ta),$$

где k_{mk} — коэффициент продолжительности использования культуры, равный для однолетних 0,03, для многолетних — 0,028;

Ta — среднесуточная температура за период вегетации культуры, °С.

Несмотря на недостатки, присущие всем регрессионным моделям, малопараметрическую модель 2-го уровня продуктивности вполне можно использовать для решения прогностических и оптимизационных задач. Например, изменяя температуру, дефицит влажности, запасы влаги в почве и количество осадков, можно прогнозировать уровень урожайности при различных значениях этих параметров. И наоборот, для оптимизации параметров можно задать уровень урожайности, а затем подбирать значения O_a , W_{sh} , Σd и Ta , после чего искать способы регулирования фактически наблюдаемых значений до рассчитанных при помощи агротехнических приемов.

Контрольные вопросы

1. Какое значение имеет влага почвы и воздуха для процессов, происходящих в экосистеме?
2. Как происходит поступление и распределение влаги в экосистеме?
3. Какие факторы обеспечивают влагоперенос в почве?
4. Какие факторы обеспечивают влагоперенос в посевах?
5. Принципы и методика разработки малопараметрической модели второго уровня продуктивности.

6. ПРОГНОЗ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАСТЕНИЙ

6.1. Значение фотосинтеза в жизни растения

В книге «Солнце, жизнь и хлорофилл» К.А. Тимирязев писал: «Когда-то, где-то на землю упал луч Солнца, но он упал не на бесплодную почву, он упал на зеленую былинку пшеничного ростка, или, лучше сказать, на хлорофилловое зерно. Ударяясь о него, он потух, перестал быть светом, но не исчез. Он только затратился на внутреннюю работу, он рассек, разорвал связь между частицами углерода и кислорода, соединенными в углекислоте. Освобожденный углерод, соединяясь с водой, образовал крахмал. Этот крахмал, превратясь в растворимый сахар, после долгих странствий по растению, отложился, наконец, в зерне в виде крахмала же или в виде клейковины. В той или другой форме он вошел в состав хлеба, который послужил нам пищей. Он преобразился в наши мускулы, в наши нервы. И вот теперь атомы углерода стремятся в наших организмах вновь соединиться с кислородом, который кровь разносит во все концы нашего тела. При этом луч солнца, таившийся в них в виде химического напряжения, вновь принимает форму явной силы. Этот луч солнца согревает нас. Он приводит нас в движение. Быть может, в эту минуту он играет в нашем мозгу».

Таким образом, фотосинтез является важнейшей физиологической функцией хлорофиллсодержащих растений, обеспечивающий процесс трансформации вещества и энергии биосферы.

Интенсивность фотосинтеза зависит от поглощенной ΦAP , концентрации CO_2 в прилистном слое атмосферы и устьично-кутикулярного сопротивления (рис. 58). Согласно методике Р.А. Полуэктова [5], брутто-фотосинтеза Φg ведется по формуле

$$\Phi g = \{Jg(r_x + r_{c\Sigma}) \pm \alpha_n [(Jg(r_x + r_{c\Sigma}))^2 - 4Jg\check{C}a r_{c\Sigma}]\} / 2r_{c\Sigma},$$

$$Jg = 1 / (1/\alpha_n Q_r + 1/\Phi_{max}),$$

$$\check{C}a = Ca + r_{c\Sigma} \cdot Rd,$$

$$r_{c\Sigma} = r_c + r_m,$$

$$r_c = 1,3/Dt + 1,6rst,$$

где r_x — сопротивление карбоксилирования;

$r_{c\Sigma}$ — устьично-кутикулярное сопротивление;

α_n — тангенс угла наклона световой кривой в точке компенсации;

Q_r — интенсивность поглощенной ΦAP ;

Φ_{max} — максимально возможный уровень фотосинтеза для растения;

r_c — сопротивление диффузии CO_2 в межклетнике;

r_m — сопротивление диффузии CO_2 в мезофилле;

$\check{C}a$ — концентрация CO_2 в межклетнике;

Ca — концентрация CO_2 в атмосфере.

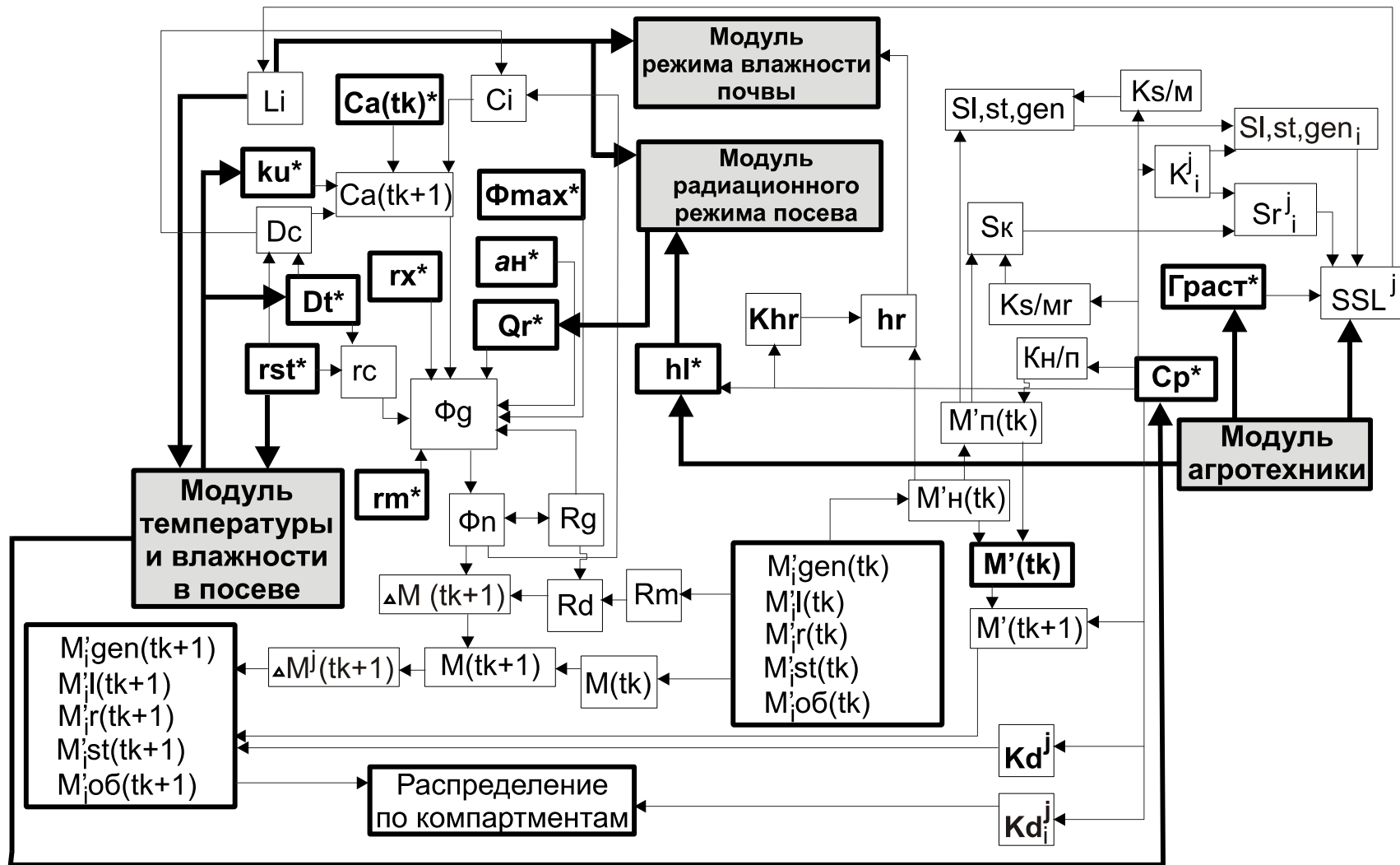


Рис. 58. Структурная схема модуля роста и развития растений:

→ — внешние связи; → — внутренние связи; * — предикторы модуля

Для связи с расчетом прироста биомассы Φg надо перевести в нетто-фотосинтез Φn :

$$\Phi n = \Phi g - Rd.$$

Итак, фотосинтез происходит в два этапа, называемые стадиями фотосинтеза: *световая стадия* и *темновой метаболизм*. Световая стадия идет в гранах хлоропласта и требует присутствия света красно-оранжевой и сине-фиолетовой части спектра. Скорость световой стадии зависит от интенсивности, спектрального состава света и концентрации хлорофилла в клетках фотосинтезирующих органов. В полевых условиях регулировать эти факторы весьма затруднительно, а порою, совсем невозможно.

Темновая фаза проходит в строме хлоропласта, не требует присутствия света и происходит как в светлое время суток, так и некоторое время после захода Солнца. В этой фазе проходит синтез ассимилятов, которые затем распределяются по всем органам растения. Скорость реакций в темновой фазе является одним из лимитирующих факторов фотосинтеза.

Следовательно, первым лимитирующим фактором фотосинтеза можно считать *интенсивность* и соотношение *световой и темновой стадий фотосинтеза*.

Второй фактор — *плотность стеблестоя в посевах* и связанное с ним *расположение листьев в пространстве* (архитектоника растительного покрова). В нижних, слабо освещенных ярусах, интенсивность фотосинтеза листьев снижается (особенно в загущенных посевах), а дыхания — остается на таком же уровне, как и у хорошо освещенных листьев. В результате растение сбрасывает нижние листья и таким образом регулирует баланс прихода и расхода ассимилятов.

Третий лимитирующий фактор — *температура*. Влияние ее объясняется тем, что в клетках растения происходят химические реакции, интенсивность которых зависит от температуры физиологического раствора, который, в свою очередь, зависит от температуры окружающей среды.

Четвертый лимитирующий фактор — *концентрация углекислого газа в клетке*. При недостатке CO_2 снижается скорость реакций синтеза органического вещества. В полевых условиях этот фактор зависит от интенсивности дыхания микроорганизмов, макроорганизмов и скорости ветра, переносящего насыщенные углекислым газом воздушные массы к посевам и выводящего обедненный этим веществом воздух за пределы экосистемы. Антропогенное регули-

рование этого фактора обеспечивается в открытом грунте внесением органических удобрений, а в защищенном, кроме органических удобрений, дополнительной подпиткой CO_2 из газовых баллонов или раскладкой кусков сухого льда.

Углекислый газ не поглощается корневой системой растений, поэтому прежде чем он будет участвовать в фотосинтезе, CO_2 из почвы должен поступить в приземный слой атмосферы, где и поглощается фотосинтезирующими органами.

Таким образом, содержание CO_2 в атмосфере определяется количеством его в естественном составе воздуха, поступлением из почвы и в процессе антропогенной деятельности.

6.2. Газообмен листа и посева

Насыщенный CO_2 воздух приземного слоя атмосферы поглощается растениями через устьица, как это показано на схеме (рис. 59).

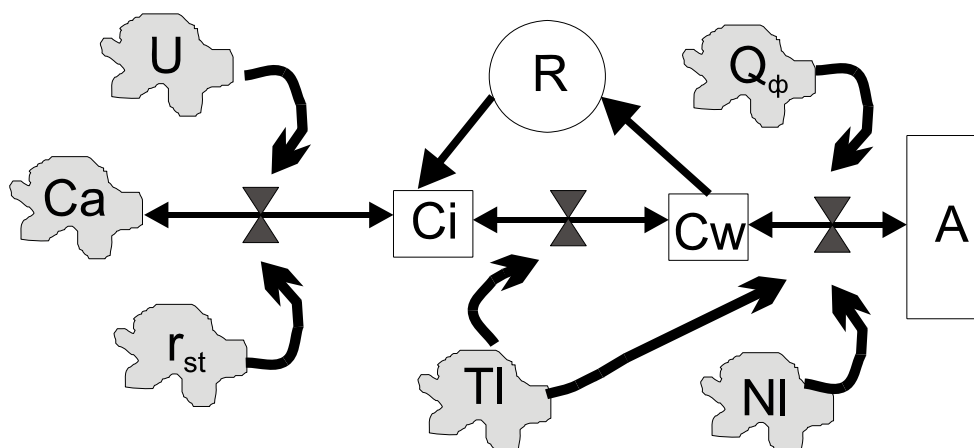


Рис. 59. Поточковая диаграмма газообмена листа

Из схемы следует, что на процесс газообмена «лист – воздух» влияет скорость ветра в посевах U и устьичное сопротивление r_{st} . Во внутреннюю полость листа C_i углекислый газ поступает не только из атмосферы C_a , но и за счет дыхания растительных клеток R . На растворимость газа влияет температура листьев T_l . Она же оказывает влияние и на скорость биохимических реакций A . Фотохимический процесс зависит от поглощенной ФАР (Q_ϕ). Наконец, на схеме показано лимитирование, связанное с возможным дефицитом азота в листьях N_l .

Интенсивность фотосинтеза возрастает с повышением температуры до $25...30\text{ }^\circ\text{C}$. Выше оптимального уровня наблюдается температурный стресс. Диапазон температур, в котором достигается

ся оптимум фотосинтеза, смещается при уменьшении снабжения углекислым газом и светом в сторону более низких значений, а сам оптимум становится более «размытым».

Углерод межклетников C_i поступает в клеточный раствор C_w , где в цикле Кельвина он расходуется на синтез ассимилятов A . Поэтому в светлое время суток $C_i < C_a$ и поток CO_2 направлен внутрь листа. В темное время суток синтез ассимилятов прекращается, но дыхание продолжается, что приводит к повышению концентрации CO_2 в клеточном растворе и в межклетниках. В этом случае $C_i > C_a$ и поток CO_2 направлен в атмосферу. В результате суточный ход газообмена листа принимает вид синусоиды (рис. 60).

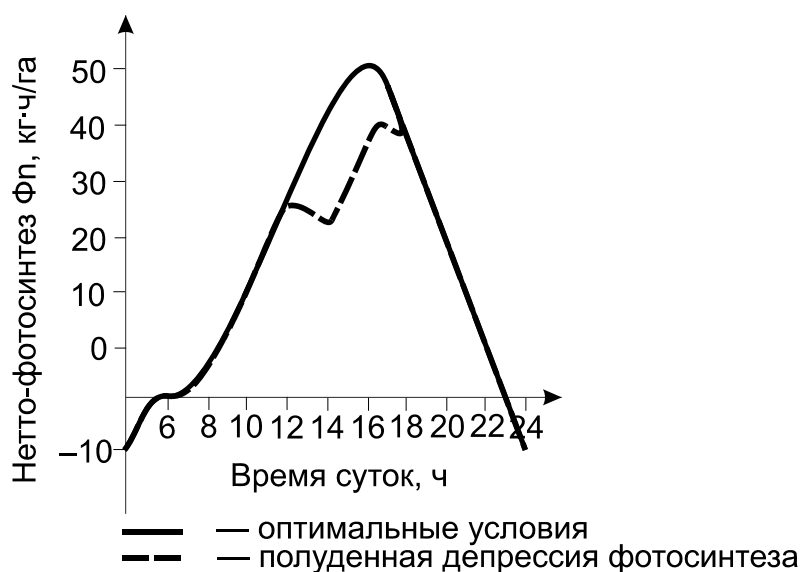


Рис. 60. Суточный ход газообмена листа

При недостатке одного или нескольких факторов, регулирующих газообмен, ситуация $C_i > C_a$ может наблюдаться и при достаточно высокой освещенности. Например, в условиях засухи концентрация влаги в межклетниках снижается, устьица закрываются. Это приводит к резкому уменьшению суммарной проводимости CO_2 и к уменьшению скорости фотосинтеза. Закрытие устьиц и уменьшение транспирации приводит к повышению температуры листа, что также снижает интенсивность фотосинтетических процессов. В результате наступает полуденная депрессия фотосинтеза. Аналогичным образом действуют и другие регулирующие газообмен факторы.

6.3. Прогноз динамики биометрических параметров и управление ростом растения

Первый уровень продуктивности определяется лимитированием работы фотосинтетического аппарата растений. Основными влияющими на этот уровень продуктивности факторами являются интенсивность поступающей фотосинтетически активной радиации и температура воздуха. Если предположить, что все остальные факторы находятся в оптимуме, это и будут комфортные условия. Любое отклонение — это уже стрессовое воздействие.

Для модели первого уровня продуктивности общий прирост биомассы за один временной шаг представляет собой разность нетто-фотосинтеза и темнового дыхания и рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned}\Delta M &= \Phi n - Rd; \\ Rd &= Rg + Rm; \\ Rg &= kg\Phi n; \\ Rm &= k_1M_l + k_2M_r + k_3M_{st} + k_4M_{gen},\end{aligned}$$

где ΔM — прирост биомассы растения за сутки, г С·1 см⁻² посева;
 Φn — чистый фотосинтез за сутки, г С·1 см⁻² посева;
 Rd — темновое дыхание за сутки, г С·1 см⁻² посева;
 Rg — дыхание роста, г СО₂·см⁻² посева;
 Rm — дыхание поддержания структуры, г СО₂·см⁻² посева;
 kg — коэффициент пропорциональности дыхания роста фотосинтезу (зерновые $kg = 0,280$, картофель $kg = 0,0255$;
 $k_1, k_2,$ — коэффициенты $k_1 = 0,03$; $k_2 = 0,010$; $k_3 = 0,015$; $k_4 = 0,01$
 k_3, k_4 (van. Koulen H., 1975; Полевой А.Н., 1983);
 M_l — биомасса листьев;
 M_r — биомасса корней;
 M_{st} — биомасса стеблей;
 M_{gen} — биомасса генеративных органов.

Следовательно, при возрастании Φn прирост биомассы линейно увеличивается.

Прибавив ΔM к биомассе предыдущего шага модели $M_{(tk)}$, получим суммарную биомассу целого растения:

$$M_{(tk+1)} = M_{(tk)} + \Delta M.$$

Для прогноза накопления биомассы необходимы входные параметры Φn и Rd , которые требуют довольно сложных расчетов и некоторых трудноопределимых параметров. Поэтому для мониторинга и прогноза в производственных условиях можно применить хотя и упрощенные, но достаточно эффективные аппроксимации динамики биомассы в зависимости от биологического времени.

Широкомасштабный мониторинг биомассы посевов сельскохозяйственных культур невозможен из-за трудоемкости методики определения биомассы корневой системы. Между тем, нашими наблюдениями установлено, что отношение надземной к подземной биомассе мало варьирует по годам. Тем не менее, это динамическая величина, существенно изменяющаяся в течение периода вегетации. Вначале его масса подземной части растения превышает надземную, но постепенно зависимость становится обратной (рис. 61).

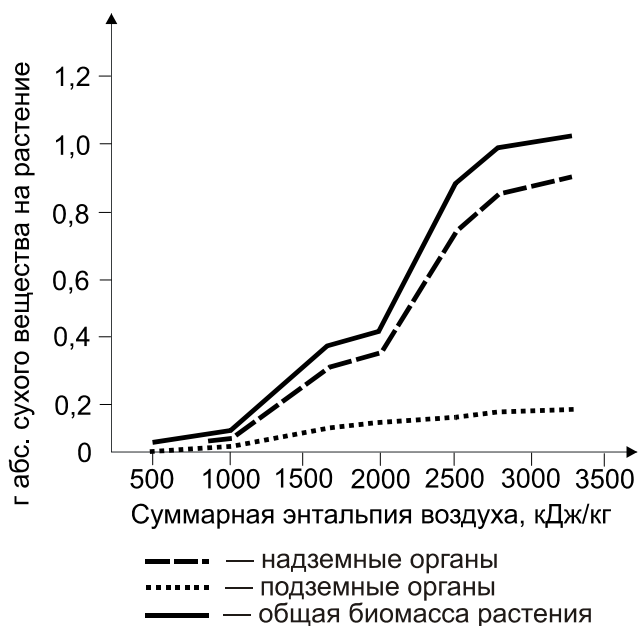


Рис. 61. Динамика биомассы ячменя (Костромская область, 1995 г.)

Характерно, что у двудольных растений этот процесс идет более интенсивно, подчиняясь экспоненциальной зависимости, в отличие от однодольных, где рост отношения «надземные / подземные органы» аппроксимируется степенной зависимостью:

— однодольные: $Kн/n = aCp^b$;
 — двудольные: $Kн/n = ae^{Cp^b}$,

где $Kн/n$ — коэффициент превышения надземной биомассы над подземной;

Верификация рассчитанных по эмпирическим данным 1995 г. функций на независимом материале в 1996 году показала хорошее совпадение теоретических и эмпирических данных:

— кукуруза — $R^2 = 0,9497$;
 — ячмень — $R^2 = 0,9877$;
 — яровая пшеница — $R^2 = 0,9997$;
 — горох — $R^2 = 0,6500$.

Следовательно, для вычисления общей биомассы растения при обследовании полей достаточно знать суммарную энтальпию воздуха от посева (или весеннего возобновления вегетации) до даты отбора образцов и абсолютно сухую надземную массу растений.

По общей массе надземных органов растения M_n и рассчитанному соотношению ее с подземной K_n/n вычисляется биомасса всего растения $M_{(tk)}$ по зависимости:

$$M_{(tk)} = M_n / K_n / n_{(tk)} + M_n_{(tk)}.$$

При отсутствии входных параметров базовой модели фотосинтеза прогноз динамики биомассы рассчитывается по функции

$$M_{(tk+1)} = aCp^b + KorrM,$$

$$KorrM = M_{(tk)} - aCp^b,$$

где M — прогнозируемая биомасса, г абс. сух. в-ва/растение;
 $KorrM$ — корректирующий коэффициент.

Верификация модели на независимом материале 1996 г. показала следующие совпадения теоретических и эмпирических данных:

— кукуруза	— $R^2 = 0,9100$;
— ячмень	— $R^2 = 0,9600$;
— овес	— $R^2 = 0,8978$;
— пшеница яровая	— $R^2 = 0,9257$;
— горох	— $R^2 = 0,9884$.

Рассчитанную общую биомассу растения следует распределить между органами растения (рис. 62), что позволит определить урожай основной, побочной продукции и корневых остатков, то есть связать модель продукционного процесса с моделями животноводства, экологии и экономики сельскохозяйственного предприятия.

Расчет ростовых функций фитоорганов целесообразно вести в относительных единицах, что позволит избежать значительного отклонения результатов от среднего по годам.

В начале роста фитоорганов их биомасса возрастает, но по мере старения и созревания наблюдается тенденция к снижению фотосинтеза и возрастанию оттока ассимилятов из фотосинтезирующих органов.

Следовательно, доля активных фитоорганов — это динамическая величина, зависящая от таксономического вида и возраста растения, определяющегося, в свою очередь, энтальпией среды:

$$Kd^j = a \ln Cp + b,$$

где Kd^j — доля j -го органа в абсолютно сухой биомассе растения.

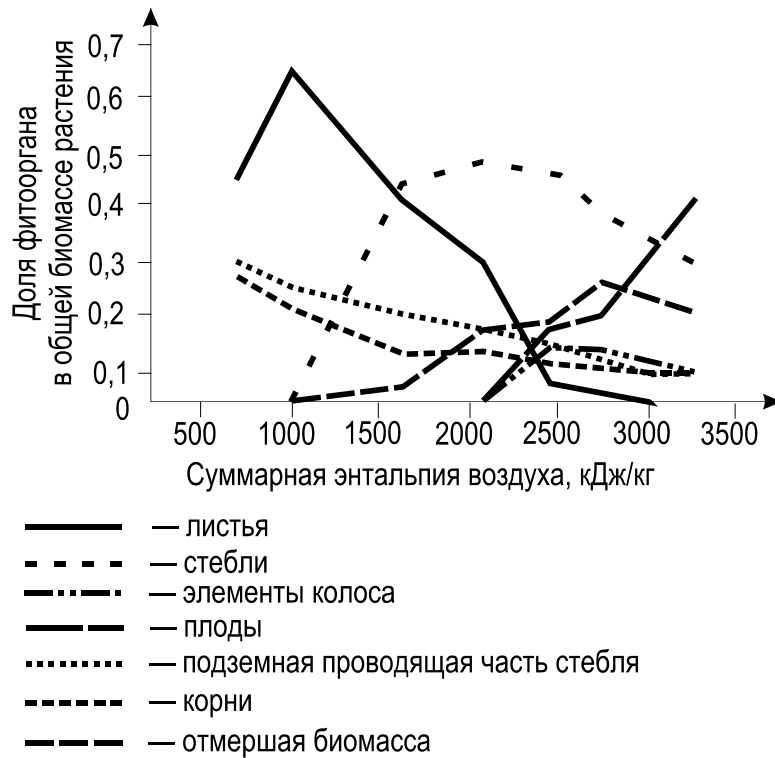


Рис. 62. Распределение деятельной биомассы по фитоорганам ячменя (доли единицы), 1995 г.

Тогда функция динамики биомассы j -го органа $M'_{(tk)}$ будет определяться как

$$M'_{(tk)} = M'_{(tk)} K d^j;$$

$$M'^{об}_{(tk)} = M'_{(tk)} - \sum M'^j_{(tk)},$$

где $M'^{об}_{(tk)}$ — суммарная биомасса отмерших органов на текущем шаге работы модели, г абсолютно сухого вещества/растение.

Период активного состояния фитоорганов определяется генетической продолжительностью вегетации, на которую накладывается действие внешних факторов, влияющих на скорость прохождения фаз развития. Одним из таких факторов является сумма тепла, полученного растением. Поэтому в тропиках высокая температура сокращает период роста и урожай зерна, несмотря на высокие уровни солнечной радиации, а в более высоких широтах с низкой температурой и, следовательно, длительным периодом роста и высоким уровнем радиации урожай зерна был гораздо выше.

На сумму полученной растением тепловой радиации влияют сроки появления всходов. В свою очередь, время появления всходов может определяться глубиной заделки семян. С увеличением

глубины посева уменьшается величина урожая, особенно это заметно для культур с массой 1 000 семян порядка $24,3 \pm 4,56$ г. Следовательно, наблюдается преимущество мелкой заделки крупных семян для сокращения до минимума периода появления всходов.

Включение ростовой функции того или иного фитооргана определяется биологическим временем — суммарной энтальпией воздуха от даты посева (или возобновления вегетации).

Нормативами некоторых технологических операций являются обработка почвы на определенную глубину или срезание надземной фитомассы на определенной высоте, что может привести к погрешности работы модели. В частности, от высоты среза зависит сбор продукции с единицы площади, так как часть надземной биомассы остается в поле. Корневая система, как и надземная масса, распределяется по компартментам неравномерно. Поэтому если применять глубокое рыхление, то накопление органических остатков будет неравномерным по глубине гумусового горизонта, а если выполняется вспашка, учет неравномерности распределения биомассы поможет смоделировать ее перераспределение по пахотному горизонту.

Если учитывать долю каждого фитооргана в компартменте, являющуюся динамической величиной, то распределение биомассы органа записывается функцией

$$M_{i(tk)}^j = M_{(tk)}^j Kd_i^j;$$

$$Kd_i^j = a \ln Cp + b,$$

где $M_{i(tk)}^j$ — биомасса j -го органа в i -м компартменте на текущем шаге работы модели, г абс. сух. в-ва/растение;
 Kd_i^j — доля j -го органа в i -м компартменте, безразмерная.

В результате становится возможным вычислить биомассу для любого компартмента в пределах диапазона работы функции Kd_i^j .

Для связи с другими модулями модели продукционного процесса модуль роста и развития растений должен обеспечивать расчет прогноза динамики индекса фитоорганов компартментов L_i^j , высоты стеблей hl , глубины корневой системы hr и количества стеблей на единице площади $\Gamma_{рас}$ (см. рис. 62).

6.4. Индекс фитоорганов компартмента

Численные значения индексов фитоорганов поступают на вход модулей влагопереноса в почве, радиационного режима посева и тепло- и влагопереноса в почве. Расчет их ведется по общей формуле

$$L_i^j = 0,0001SSI_i^j \Gamma,$$

где L_i^j — индекс j -го фитооргана в i -м компартменте;

SSI_i^j , — площадь j -го органа в i -м компартменте для одного растения, см²;

Γ — количество растений на 1 м².

Из формулы следует, что основным параметром при расчете индексов является плотность популяции и площадь фитоорганов. Определить последнюю в полевых условиях достаточно затруднительно, что ограничивает применение стандартных методов при массовом мониторинге посевов. Кроме того, этот параметр динамический, зависящий от возраста растения, степени воздействия растительных организмов и агротехнических условий. Например, возрастание площади корней и листьев овса наблюдается до фазы трубкования, стеблей — от трубкования до выметывания, генеративных органов — от выметывания до твердой спелости. В дальнейшем фитоорганы отмирают и площадь их активной поверхности постепенно снижается (рис. 63).

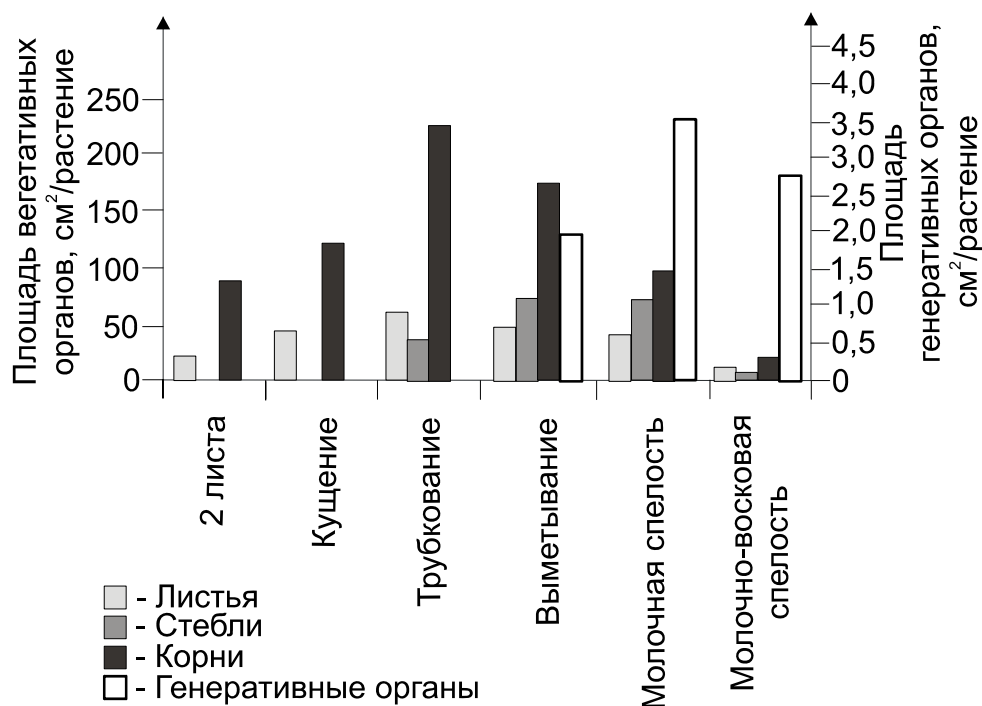


Рис. 63. Динамика площади ассимилирующих фитоорганов овса, 1995 г.

Результаты наших наблюдений позволили значительно упростить методику определения площади активной поверхности фитоорганов, исходя из предположения наличия связи между биомассой растения и площадью его органов. Поскольку первая — динамический параметр, следовательно, ее изменение повлечет за собой изменение второй. Поэтому было вычислено отношение площади надземных органов к их биомассе $K_{s/m}$ и корневой системе $K_{s/mr}$. В результате получаем функцию

$$S_{l,st,gen} = M'_n K_{s/m},$$

$$S_r = M'_n K_{s/mr},$$

где $S_{l,st,gen}$ — площадь надземных фитоорганов, см^{-2} ;
 S_r — площадь корневой системы, см^{-2} ;
 M'_n — масса надземных фитоорганов, г/растение;
 M'_n — масса корневой системы, г/растение.

Площадь надземных органов нецелесообразно разделять на листья, стебли и генеративные органы, так как все они участвуют в фотосинтезе.

Коэффициенты $K_{s/m}$ и $K_{s/mr}$ описываются системой динамических функций от суммарной энтальпии воздуха.

Далее вычисляется площадь фитоорганов одного растения (или одного стебля) SSI . Распределение их по компартментам рассчитывается по функциям

$$SSI = S_{l,st,gen,r} K_i^j,$$

$$K_i^j = a \ln Cp + b,$$

где K_i^j — доля фитооргана в компартменте.

В результате, проведя учет надземной биомассы в полевых условиях, можно вычислить массу корневой системы, затем рассчитать площадь надземной и подземной частей растения, которая в дальнейшем распределяется по атмосферным и почвенным компартментам.

6.5. Динамика высоты стеблей и глубины корневой системы растений

Входными параметрами модулей «режим влажности почвы» и «радиационный режим посева» являются высота посева и глубина корневой системы. Эти параметры изменяются во времени, следовательно, процесс следует описать динамическими функциями.

Для нормального роста растению необходимы вода и минеральное питание. Поэтому в гетеротрофный период первоначально растет корень, что объясняет преобладание длины корня над высотой стебля, причем такая закономерность характерна не только для однолетних растений, но и для многолетних в период весеннего отрастания. После укоренения начинает расти стебель, высота которого очень быстро превосходит длину корня (рис. 64).

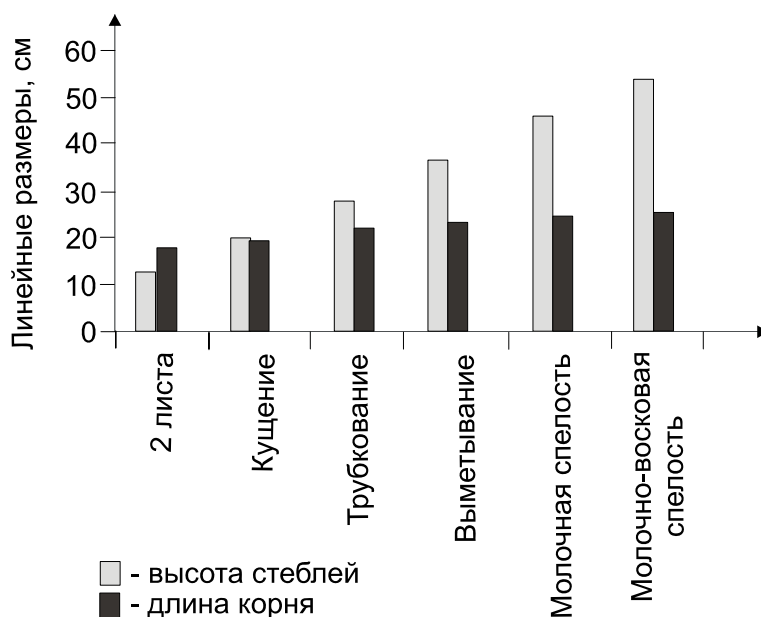


Рис. 64. Динамика линейных параметров яровой пшеницы, 1995 г.

Следует отметить, что интенсивность роста стебля выше у двудольных, чем у однодольных, поэтому динамика высоты растений этих классов описывается разными типами функций:

– однодольные: $hl = a \ln Cp + b$;

– двудольные: $hl = a Cp^b$,

где hl — высота растений, см.

В течение периода вегетации изменяется и глубина основной массы корневой системы. Однако зависимость этого параметра от высоты растений не является линейной. В начальный период длина корней значительно превышает высоту надземных органов, но постепенно тенденция становится противоположной. Если вычислить отношение «глубина корневой системы / высота растения», то получается коэффициент, зависящий от биологического времени и с достаточно высокой точностью рассчитывающийся степенной функцией от суммарной энтальпии воздуха:

$$K_{hr} = a Cp^b,$$

где K_{hr} — коэффициент глубины корневой системы.

Применение этого коэффициента значительно упрощает мониторинг посевов, так как исключается необходимость трудоемкой операции по извлечению почвенного монолита и отделение корневой системы от почвы, поскольку длина корня рассчитывается как

$$hr = hl K_{hr}.$$

Структурная схема модуля роста и развития растения, предусматривающая работу в режимах «базовый» и «мониторинг», представлена на рисунке 62. В базовом режиме на вход подаются: концентрация углекислого газа в атмосфере C_a ; максимально возможный уровень фотосинтеза для растения Φ_{max} ; тангенс угла наклона световой кривой в точке компенсации α_n ; интенсивность поглощенной ФАР Q_r (подается с модуля радиационного режима посева); сопротивление карбоксилирования r_x ; сопротивление диффузии CO_2 в межклетнике r_m ; сопротивление устьиц r_{st} ; проводимость прилистного слоя воздуха для тепла D_t и коэффициент турбулентного обмена количества движения ku , который подается с модуля тепло- и влагопереноса в посеве.

При работе в режиме мониторинга вводятся необходимые для прогноза исходные характеристики посева, полученные эмпирическим путем: плотность популяции растений $\Gamma_{раст}$; высота надземной массы растения hl ; абсолютно сухая масса надземной части растений M' . Поскольку прогноз биометрии строится на основе суммарной энтальпии воздуха C_p , значение этого параметра берется с выхода модуля тепло- и влагопереноса в посеве.

С выхода рассматриваемого модуля снимается биомасса фитоорганов, распределенная по компартментам атмосферы и почвы, которую в дальнейшем можно использовать как самостоятельный параметр или подавать на вход экономической модели управления сельскохозяйственным производством.

Для работы других модулей модели продукционного процесса с выхода данного модуля снимаются индекс фитоорганов (для модулей тепло- и влагопереноса в посеве, влагопереноса в почве, радиационного режима посева), сопротивление устьиц (для модуля тепло- и влагопереноса в посеве), высота растения (для модуля радиационного режима посева), глубина корневой системы (для модуля влагопереноса в почве).

6.6. Динамика количества растений на единице площади

По результатам обобщения экспериментального материала [1] установлено, что самоизреживание популяций наблюдается с постоянной скоростью. Причем, чем ниже исходная плотность популяции, тем позднее начинают проявляться конкурентные взаимодействия (рис. 65).

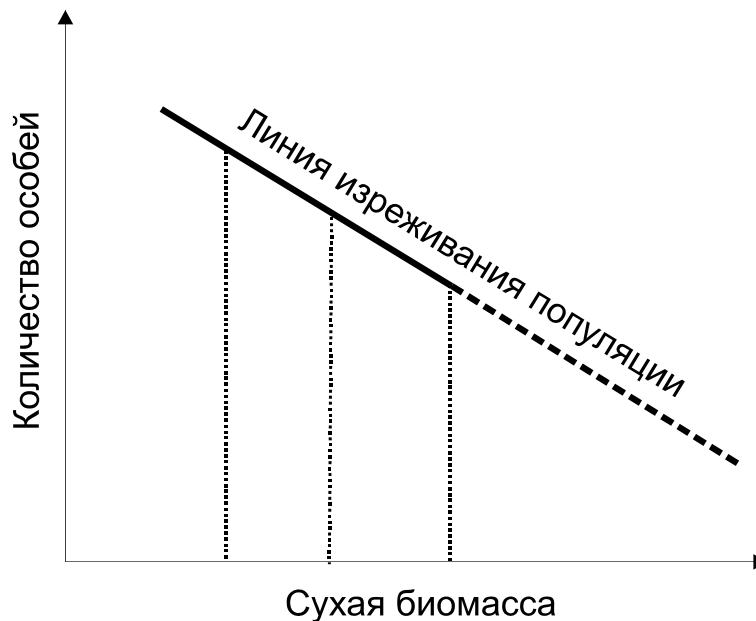


Рис. 65. Динамика численности популяции при изреживании в соответствии с «законом степени $-3/2$ »

Наблюдениями за популяциями различных таксономических видов растений обнаружено, что наклон линии изреживания является величиной постоянной. Поэтому чем выше начальная плотность, тем раньше начинается изреживание. Эту зависимость часто называют «закон степени $-3/2$ » [1]:

$$w' = cd^{-3/2},$$

где w' — средняя масса одного растения;

c — коэффициент, определяющий высоту заложения линии по оси Y .

d — плотность, экз./м²;

Управление параметрами продукционного процесса в рассматриваемом модуле осуществляется через регулирование плотности популяции $\Gamma_{раст}$, высоты hl и площади фотосинтезирующих органов SSl' растений.

Исходное количество растений на единице площади определяется, главным образом, нормой посева или посадки и операциями по формированию оптимальной плотности растений на единице площади. Площадь фотосинтезирующих органов зависит в первую очередь от таксономического вида культуры, сорта и уровня минерального питания. Регулирование высоты растений выполняется путем обработки посевов ретардантами и выбором сорта.

Компьютерный вариант модуля работает в режиме мониторинга производственных посевов основных полевых культур. По запросу программы вводятся:

- масса абсолютно сухого вещества надземных фитоорганов, г/растение;
- плотность популяции культурного растения, стеблей/м² или растений/м;
- средняя высота стеблей, см;
- диапазон суммарной энтальпии и шаг расчета.

С выхода модуля снимаются: фаза развития растения, плотность популяции культурного растения, суммарная энтальпия воздуха, масса абсолютно сухого вещества с 1 м² (в том числе масса листьев, стеблей, корней, генеративных органов, семян, подземной проводящей части стебля, отмершей биомассы), площадь и индекс надземных и подземных фитоорганов, распределение массы, индексов и площади фитоорганов по компартментам с интервалом и на период, задаваемые пользователем.

Корреляционный анализ между расчетными и эмпирическими значениями параметров биомассы растений показал высокую степень соответствия, что обеспечивает применение модуля в условиях производства для расчета прогноза роста и развития ежи сборной, льна-долгунца, ярового рапса, ячменя, овса, яровой пшеницы, гороха и кукурузы (табл. 2).

Таблица 2. Оценка верификации модуля роста и развития растений по коэффициенту корреляции r

Культура	Глубина корней	Масса абсолютно сухого вещества							
		Суммарная	Листья	Стебли	Генеративные органы	Семена	Подземная проводящая часть стебля	Отмершая	Корни
Ежа сборная	0,90	0,97	0,93	0,99	0,99	*	**	0,85	0,94
Лен-долгунец	0,84	0,87	0,99	0,93	1,00	*	0,66	0,99	0,90
Рапс яровой	0,95	0,99	0,99	0,99	1,00	*	0,99	0,86	0,92
Ячмень	0,70	0,99	0,98	0,91	1,00	1,00	0,68	0,66	0,97
Овес	0,61	0,99	0,99	0,99	0,96	0,99	0,78	0,83	0,90
Яровая пшеница	0,17	0,99	0,95	0,99	0,99	0,99	0,88	0,84	0,61
Горох посевной	0,90	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,48	0,99	0,96
Кукуруза (на силос)	0,40	0,99	0,99	0,98	0,98	*	0,38	0,97	0,86

Примечания:

* — входит в массу генеративных органов;

** — входит в массу корневой системы.

Контрольные вопросы

1. Какое значение имеет фотосинтез в жизни растения?
2. Как происходит газообмен в листе и посеве?
3. Какими факторами регулируется фотосинтез?
4. Факторы, влияющие на интенсивность газообмена листа?
5. Что означает «закон степени $-3/2$ »?
6. Какова методика прогноза и мониторинга динамики биометрических параметров растения?

7. МИНЕРАЛЬНОЕ ПИТАНИЕ РАСТЕНИЙ

Величина и стабильность урожаев культур в Нечерноземной зоне во многом зависят от уровня плодородия почвы, для управления которым необходимо изучение методов количественного учета его компонентов, установление оптимальных параметров их гидротермических, физико-химических, химических и биологических свойств.

Минеральные вещества составляют 5-7% массы растения, но являются необходимой составной частью. В состав клеток входят все химические элементы, встречающиеся в неживой природе, в том числе редкие и радиоактивные элементы. Содержание элементов в растениях различно, поэтому по количеству их можно разделить на три группы.

Макроэлементы содержатся в количестве от 10 до 10⁻²%. Сюда относятся основные органогены (кислород, водород, углерод, азот, фосфор), а также кремний, калий, кальций, сера, магний, натрий, алюминий.

Микроэлементы обнаруживаются в количестве от 10⁻³ до 10⁻⁵%. Это марганец, бор, стронций, медь, цинк, бром, олово, никель, титан, рубидий, железо, барий, молибден, кобальт, йод.

Ультрамикроэлементы (10⁻⁶...10⁻¹²%), к которым относятся мышьяк, германий, свинец, золото, радий, ртуть, серебро и др.

Из органогенов строятся углеводы, белковые вещества. Фосфор и сера входят в состав протоплазмы. Остальные вещества являются, главным образом, факторами, непосредственно обеспечивающими обмен веществ, строение клеток и состояние протопласта. Минеральные вещества обеспечивают токсическое и антитоксическое влияние на живые ткани, выполняют функции катализаторов биохимических реакций, играют роль в изменении тургора и проницаемости цитоплазмы, являются центром электрических и радиоактивных явлений в растительных организмах.

Минеральное питание растений осуществляется путем поглощения питательных веществ корневой системой из почвы. В почвенном растворе содержится незначительная часть элементов. Основное их количество достаточно прочно удерживается почвенным поглощающим комплексом. Механизм поступления питательных веществ из почвы идет по трем потокам.

1. *Корневой перехват.* В процессе роста корни вступают в контакт с новым объемом почвы, из которого и поглощают питательные вещества.

2. *Массовый поток* ионов к поверхности корней происходит при поглощении корнями воды с растворенными в ней веществами. Это основной путь, зависящий от количества воды в почве, концентрации ионов в почвенном растворе, скорости поглощения воды корнями и размеров корневой системы.

3. *Диффузионный поток* ионов к корню на основе градиента концентрации, в направлении которого передвигаются ионы. Этот поток всегда направлен перпендикулярно к поверхности корня. По количеству содержания в почве органического вещества и минеральных элементов судят о почвенном плодородии.

Что же такое плодородие почвы? В общем виде — это способность почвенного покрова удовлетворять потребности растений в элементах питания, воде, воздухе, тепле, свете и физико-химических условиях. В агрономическом смысле под плодородием почвы понимают ее способность служить растениям средой обитания, источником и посредником в обеспечении водой, элементами питания и другими земными факторами жизни, а также обеспечивать возможность индустриального ведения производства и быть устойчивой против всех факторов разрушения.

Поскольку нет единого мнения и единой формулировки плодородия почвы, постольку нет и одинакового толкования этого свойства. Отсюда варианты: естественное плодородие, природное, потенциальное, базисное, эффективное, текущее, полное. Большинство этих версий не отражает сущности системного моделирования, а поэтому применимы, пожалуй, в вербальных (словесных) моделях, которые легко оперируют словами типа «больше – меньше» и не несут числовой информации.

В связи с этим наиболее пригодна формулировка Шишова (1987), согласно которой природное плодородие почвы определяется как совокупность ее свойств и режимов, весь комплекс экологических условий, на фоне которых она развивается. На плодородие почвы действуют не только эти факторы, но и хозяйственная деятельность человека, которая оказывает как положительное, так и отрицательное влияние. Поэтому вместо «естественного» плодородия уместнее использовать термин «потенциальное» плодородие, которое включает и природные, и антропогенные факторы.

Потенциальное плодородие проявляется на фоне средних многолетних климатических условий и относительно стабильно. Изменяется только при коренных мелиорациях или других глобальных воздействиях. Это возможное плодородие почвы, проявляющееся при определенных экологических и технологических условиях. Не всегда, а точнее, очень редко реализуется весь потенциал.

Чаще всего на величину урожая оказывает действие некоторая часть потенциального плодородия, которая называется *эффективное плодородие*. В хозяйственной деятельности оно проявляется как суммарный результат мобилизации элементов потенциального плодородия с помощью агротехнических и других приемов. Это уже лабильный показатель, который изменяется как в многолетнем цикле, так и в течение сезона вегетации.

Плодородие почв оценивают двумя различными способами:

- по шкале бонитировки;
- по разработанным моделям с варьированием параметров плодородия.

Бонитировка почвы основана на отношении ее плодородия для данной культуры к плодородию принятой за эталон почвы, которая оценивается в 100%. Метод этот довольно громоздкий, в нем учитывается урожайность, являющаяся, в свою очередь, функцией плодородия и зависящая от многих показателей, вводится большое количество коэффициентов, которые настолько усреднены по результатам многочисленных наблюдений, что становятся мало пригодными для моделирования, да и для практического использования они слишком трудоемки, условны и узколокальны.

Второй путь более перспективен и более универсален — разработка функций плодородия. Это или полиномиальная функция

$$Y = a_0 + a_1X_1 + b_1X_1^2 + a_2X_2 + b_2X_2^2 + c_1X_1X_2 \dots$$

или мультипликативная:

$$Y = a_0f_1(X_1)f_2(X_2) \dots f_n(X_n),$$

где a, b, c — эмпирические коэффициенты;

X_1, \dots, X_n — факторы плодородия почвы;

f_1, \dots, f_n — функции, определяющие влияние отдельных факторов на урожайность.

Мультипликативная форма задания функции имеет определенные преимущества, так как частные функции $f_n(X_n)$ имеют некоторую общность для разных почвенно-климатических условий. Полиномиальная же функция, благодаря наличию эмпирических коэффициентов, «жестко» привязана к условиям эксперимента и мало пригодна для применения в других условиях. Кроме того, при введении в полиномиальную функцию дополнительного фактора X_{n+1} приходится вместе с ним изучать и предыдущие, уже изученные X_n , чтоб вывести новые коэффициенты a, b и c .

7.1. Прогноз содержания органических и минеральных веществ в почве

Прогноз содержания гумуса в почве

Важнейшее значение в плодородии почвы имеет содержание в ней органического вещества и его качественное состояние. От этого зависят физико-механические и технологические свойства пахотного горизонта, агрегатное состояние, водопрочность микроструктуры, микробиологическая активность и другие физико-химические параметры почвы.

Динамика гумуса складывается из двух противоположных процессов: минерализации и гумификации. Приходные статьи гумусового баланса включают органические удобрения, азот минеральных удобрений, корневые и пожнивные остатки. Расходные статьи — минерализация гумуса микроорганизмами и, в некоторых случаях, ветровая и водная эрозия.

Методы расчета баланса гумуса весьма разнообразны. Наиболее широко применяется упрощенный расчет баланса гумуса по углероду [4]:

$$\begin{aligned}
 ГУМ &= 1,724 \cdot C_{гум}, \\
 C_{гум} &= [(aY + b) k_c k_{гум} + O_y k_{св} K'_c K'_{гум}] - \\
 &- [Y k_{N_в} П_n П_k - (O_y k_{N_{оу}} k_{u_{N_{оу}}} + N_m k_{u_{N_m}} N_m) - \\
 &- (O_y + b) k_{N_{осм}} k_{u_{N_{осм}}}],
 \end{aligned}$$

где $C_{гум}$ — углерод, т·га⁻¹;

Y — урожай культуры в севообороте (основная продукция), т·га⁻¹;

k_c, K'_c — относительное содержание углерода в сухом веществе растительных остатков и навоза, доли единицы;

$k_{св}$ — относительное содержание сухого вещества, доли единицы;

$k_{гум}, K'_{гум}$ — коэффициенты гумификации растительных остатков и навоза;

$k_{N_в}$ — относительный вынос азота с урожаем с учетом побочной продукции;

$П_n, П_k$ — поправочные коэффициенты к почвам $П_n$ и культурам $П_k$, безразмерная;

$k_{N_{оу}}$ — коэффициент использования азота органических удобрений, безразмерная;

O_y — доза органических удобрений, т·га⁻¹;

N_m — доза минерального азота, т·га⁻¹;

- ku_{N_m} — коэффициент использования азота минеральных удобрений;
- $ku_{N_{oy}}$ — коэффициент использования азота органических удобрений;
- $k_{N_{ост}}$ — относительное содержание азота в сухом веществе корневых и пожнивных остатков;
- $ku_{N_{ост}}$ — коэффициент использования азота корневых и пожнивных остатков.

Если ввести в формулу прогнозируемую урожайность культур, можно будет рассчитать баланс гумуса в целом по севообороту и целенаправленно регулировать поступление и расход органического вещества почвы.

Прогноз содержания подвижных минеральных элементов в почве

Для управления плодородием почв и определения потребности в удобрениях важное значение имеет прогноз изменения содержания подвижных форм питательных веществ в почве. Агрохимическое обследование почв открытого грунта проводится с интервалом 5 лет. За эти годы происходит вынос элементов с урожаем сельскохозяйственных культур и поступление их с удобрениями, варьирует микробиологическая активность. Все это приводит к необходимости расчета запаса питательных веществ в почве перед посевом или посадкой культуры по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 N_n &= Nn_{ucx} + Nn_{np}, \\
 P_n &= Pn_{ucx} + Pn_{np}, \\
 K_n &= Kn_{ucx} + Kn_{np}, \\
 Nn_{np} &= ((\sum N_m + \sum N_{oy} + \sum N_{\phi} + \sum N_{c\phi} + \sum N_{oc} + \sum N_c) - \sum N_6) / H_N, \\
 Pn_{np} &= ((\sum P_m + \sum P_{oy}) - \sum P_6) / H_P, \\
 Kn_{np} &= ((\sum K_m + \sum K_{oy}) - \sum K_6) / H_K, \\
 N_{\phi} &= k_{N\phi} M,
 \end{aligned}$$

- где M — максимальная биомасса растения, т·га⁻¹;
- N_n, P_n, K_n — легкогидролизуемый азот N_n , подвижный фосфор P_n и обменный калий K_n в год проведения анализа (или прогнозируемая величина от прошлого анализа), мг·100 г⁻¹ почвы;
- N_m, P_m, K_m — азот, фосфор, калий минеральных удобрений, вносимых в год получения урожая, кг·га⁻¹;
- N_{oy}, P_{oy}, K_{oy} — азот, фосфор, калий органических удобрений, вно-

- симых в год получения урожая, $\text{кг}\cdot\text{га}^{-1}$;
- N_{ϕ}, N_{oc} — азот, поступающий за счет азотфиксации бобовыми травами N_{ϕ} , свободными азотфиксаторами $N_{c\phi}$, с осадками N_{oc} и семенами N_c , $\text{кг}\cdot\text{га}^{-1}$;
- $Nn_{np}, Pn_{np}, Kn_{np}$ — прогнозируемое содержание подвижных питательных веществ в почве в год получения урожая, $\text{мг}\cdot 100 \text{ г}^{-1}$;
- $Nn_{исх}, Pn_{исх}, Kn_{исх}$ — исходное содержание питательных веществ в почве в год проведения агрохимического анализа почвы, $\text{мг}\cdot 100 \text{ г}^{-1}$;
- $\Sigma N_m, \Sigma N_{oy}$ — сумма азота минеральных ΣN_m , органических ΣN_{oy} удобрений, азота, фиксированного клубеньковыми ΣN_{ϕ} и свободноживущими $\Sigma N_{c\phi}$ бактериями, поступившего с осадками ΣN_{oc} , и семенами ΣN_c за годы после проведения агрохимического анализа, $\text{кг}\cdot\text{га}^{-1}$ ($N_c = 19 - 37 \text{ кг}\cdot\text{га}^{-1}$, $N_{oc} = 9 \text{ кг}\cdot\text{га}^{-1}$ в год);
- $\Sigma P_m, \Sigma P_{oy}, \Sigma K_m, \Sigma K_{oy}$ — суммы фосфора ΣP_m и калия ΣK_m минеральных и органических ($\Sigma P_{oy}, \Sigma K_{oy}$) удобрений, внесенных за годы после агрохимического анализа почвы, $\text{кг}\cdot\text{га}^{-1}$;
- $\Sigma N_{\epsilon}, \Sigma P_{\epsilon}, \Sigma K_{\epsilon}$ — суммы азота, фосфора и калия, вынесенные из почвы с урожаями культур за годы после агрохимического анализа, $\text{кг}\cdot\text{га}^{-1}$;
- H_N, H_P, H_K — дозы азота, фосфора и калия удобрений ($\text{кг}\cdot\text{га}^{-1}$), остающиеся в почве сверх выноса с урожаями, необходимые для повышения содержания питательных веществ на $1 \text{ мг}\cdot 100 \text{ г}^{-1}$ почвы;
- KN_{ϕ} — количество азота, накапливаемого бобовыми культурами в почве за счет азотфиксации, $\text{кг}\cdot 100 \text{ г}^{-1}$, урожая сухой биомассы (клевер $KN_{\phi} = 0,950$, люцерна $KN_{\phi} = 1,050$, викоовсяная смесь $KN_{\phi} = 0,021$).

Прогноз кислотности почвы

Кислотность почвы является лимитирующим фактором в большинстве сельскохозяйственных районов России. Поскольку интервал агрохимических обследований на кислотность почвы составляет 5 лет, возникает необходимость прогнозирования этого показателя в период между обследованиями.

Обычно кислотность определяется по pH_{KCl} и рассчитывается по функциям

$$pH = pH_{исх} + pH_{np},$$

$$pH_{np} = 0,63 \Sigma C_a - 0,14 \Sigma N^{0,5} \Sigma C_a^{0,5} + 0,19 \Sigma K^{0,5} \Sigma C_a^{0,5},$$

где pH — фактическое (или прогнозируемое) значение pH ;
 $\Sigma C_a, \Sigma N, \Sigma K$ — дозы кальция, азота, калия за прогнозируемый период, т·га⁻¹;
 pH_{np} — прогнозируемое значение pH ;
 $pH_{исх}$ — исходное значение pH .

По величине pH_{KCl} рассчитывается доза известковых материалов для оптимизации этого параметра для той или иной сельскохозяйственной культуры.

7.2. Малопараметрическая модель минерального питания растений

Минеральное питание растений описывается в модуле почвенного питания модели продукционного процесса растений. Расчет продуктивности культуры выполняется по функциям:

$$M_{(soil)} = M \prod_{fn=1}^n K^{fn};$$

$$K^n, K^p, K^k = \left(\frac{N, P, K}{N_{op}, P_{op}, K_{op}} \right)^{1,35} e^{1,1 (1-N, K, P/N_{op}, P_{op}, K_{op})};$$

$$N = m_N N_n + N_m + mN_{oy} N_{oy} + mN_\phi N_\phi + N_{oc} + N_{c\phi} + N_c;$$

$$P = m_P P_n + P_m + mP_{oy} P_{oy};$$

$$K = m_K K_n + K_m + mK_{oy} K_{oy};$$

$$N_{op} = 10 C_n M;$$

$$P_{op} = 10 C_p M;$$

$$K_{op} = 10 C_k M;$$

$$K^{pH} = (pH / pH_{op})^{24,3} e^{25,2(1 - pH/pH_{op})};$$

$$K^{ок.n} = (OK_n/4)\omega,$$

где $M_{(soil)}$ — биомасса растения с поправкой на элементы почвенного плодородия, т·га⁻¹;

M — максимальная биомасса растения, т·га⁻¹;

K^{fn} — функции оптимальности обеспеченности: азотом K^n , фосфором K^p , калием K^k , кислотностью K^{pH} , баллом окультуренности $K^{он}$;

- N, P, K — суммарное количество N, P₂O₅, K₂O (внесенных с удобрениями и содержащихся в почве), эквивалентное применяемому минеральному удобрению, кг·га⁻¹;
- N_{op}, P_{op}, K_{op} — оптимальное количество N, P₂O₅, K₂O, необходимое для получения биомассы;
- m_N, m_P, m_K — коэффициенты эквивалентности легкогидролизуемого азота m_N (по Кирсанову), подвижного фосфора m_P и калия m_K (по Кирсанову) почвы азоту, фосфору и калию минерального удобрения, кг·мг⁻¹·100 г⁻¹;
- $mN_{oy}, mP_{oy}, mK_{oy}$ — коэффициенты эквивалентности азота mN_{oy} , фосфора mP_{oy} и калия mK_{oy} органических удобрений азоту, фосфору и калию минеральных удобрений, кг·кг⁻¹;
- mN_{ϕ} — коэффициент эквивалентности азота, фиксированного бобовыми растениями, азоту минерального удобрения (по пласту), кг·кг⁻¹;
- N_n, P_n, K_n — легкогидролизуемый азот N_n , подвижный фосфор P_n и обменный калий K_n в год проведения анализа (или прогнозируемая величина от прошлого анализа), мг·100 г⁻¹ почвы;
- N_M, P_M, K_M — азот, фосфор, калий минеральных удобрений, вносимых в год получения урожая, кг·га⁻¹;
- N_{oy}, P_{oy}, K_{oy} — азот, фосфор, калий органических удобрений, вносимых в год получения урожая, кг·га⁻¹;
- $N_{\phi}, N_{oc}, N_{c\phi}, N_c$ — азот, поступающий за счет азотфиксации бобовыми травами N_{ϕ} , свободными азотфиксаторами $N_{c\phi}$, с осадками N_{oc} и семенами N_c , кг·га⁻¹;
- C_n, C_p, C_k — коэффициенты затрат азота, фосфора, калия почвы и удобрений в кг на 100 кг сухого вещества для получения максимального урожая M , т·га⁻¹, обеспечиваемого ресурсами света, тепла и увлажнения;
- pH — фактическое (или прогнозируемое) значение pH;
- pH_{op} — оптимальное значение pH для данной культуры;
- $K^{ок.п}$ — функция оптимальности окультуренности почвы;
- OK_n — показатель окультуренности почвы, балл;
- ω — коэффициент, зависящий от культуры (пшеница озимая, ячмень, горох, вика — 0,45; картофель, люцерна, подсолнечник, кукуруза — 0,5; клевер луговой — 0,4; озимая рожь, овес — 0,3; кострец, тимофеевка, лисохвост — 0,2; ежа сборная — 0,15; злаковые травосмеси — 0,17; бобово-злаковые травосмеси — 0,35).

7.3. Регулирование режима химического состава почвы

Основными способами изменения агрохимических параметров почвы являются внесение органических и минеральных удобрений, а также известкование. Применение средств химизации должно быть экономически эффективным, поэтому одним из условий является точное определение потребности растений в элементах минерального питания. При недостатке одного из необходимых элементов планируемую продуктивность не будет достигнута, а при избытке — затраты на внесение удобрений в текущем году не дадут прибыли. Кроме того, в последнем случае возникает опасность снижения качества продукции, загрязнения грунтовых и поверхностных вод подвижными соединениями азота.

Точность способа определения доз стала особенно актуальной в последние годы, поскольку ограниченные ресурсы удобрений и известковых материалов должны давать максимальный эффект от их применения. По данным А.С. Образцова [4], в настоящее время опубликовано более 40 способов расчета доз удобрений, но наиболее широко применяется метод элементарного баланса, по причине его логичности и простоты расчетной схемы. Этот метод подразумевает, что:

- 1) в пределах оптимальных доз действие каждого элемента, согласно принципу лимитирования, можно считать независимым;
- 2) для повышения точности доз удобрений на планируемую урожайность все источники и формы каждого из элементов питания, различающиеся по степени усвояемости растениями, приводятся к форме, эквивалентной по действию на урожай питательному веществу применяемого удобрения [4].

На основании методики вышеуказанного автора, доза действующего вещества удобрений рассчитывается по формуле

$$\Theta = 10 cX M - mX X_n - mN_{cf} N_{cf} - N_{oc}.$$

Минеральное удобрение $X_m = \Theta$.

Органическое удобрение $X_{oy} = \Theta / mX_{oy}$.

Совместное внесение органического и минерального удобрения

$$X_{oy} = \Theta - mX_{oy} X_{oy},$$

где cX — коэффициенты выноса N, P, K с урожаем, кг/т;

M — масса урожая, т/га;

mX — коэффициенты для N, P, K ;

X_n — содержание N, P, K в почве, $\text{мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$;

- mN_{cf} — коэффициент эквивалентности азота, фиксированного свободноживущими азотфиксаторами, азоту минерального удобрения, $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$;
- N_{cf} — количество азота, фиксированного свободноживущими азотфиксаторами, $\text{кг}\cdot\text{га}^{-1}$;
- N_{oc} — количество азота, поступившего с осадками;
- X_m, X_{oy} — дозы действующего вещества минерального и органического удобрений (N, P, K), $\text{кг}\cdot\text{га}^{-1}$;
- mX_{oy} — коэффициент эквивалентности действующего вещества органического удобрения действующему веществу минерального удобрения, $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$.

Блок расчета доз удобрений работает в случае недостаточной обеспеченности элементами питания планируемой урожайности при условии окупаемости применения удобрений. На вход поступают следующие исходные данные (рис. 66): плановая урожайность культуры M , обеспеченность почвы азотом, фосфором и калием; дополнительно с блока азотного питания вводятся азот, поступающий за счет свободных азотфиксаторов и осадков.

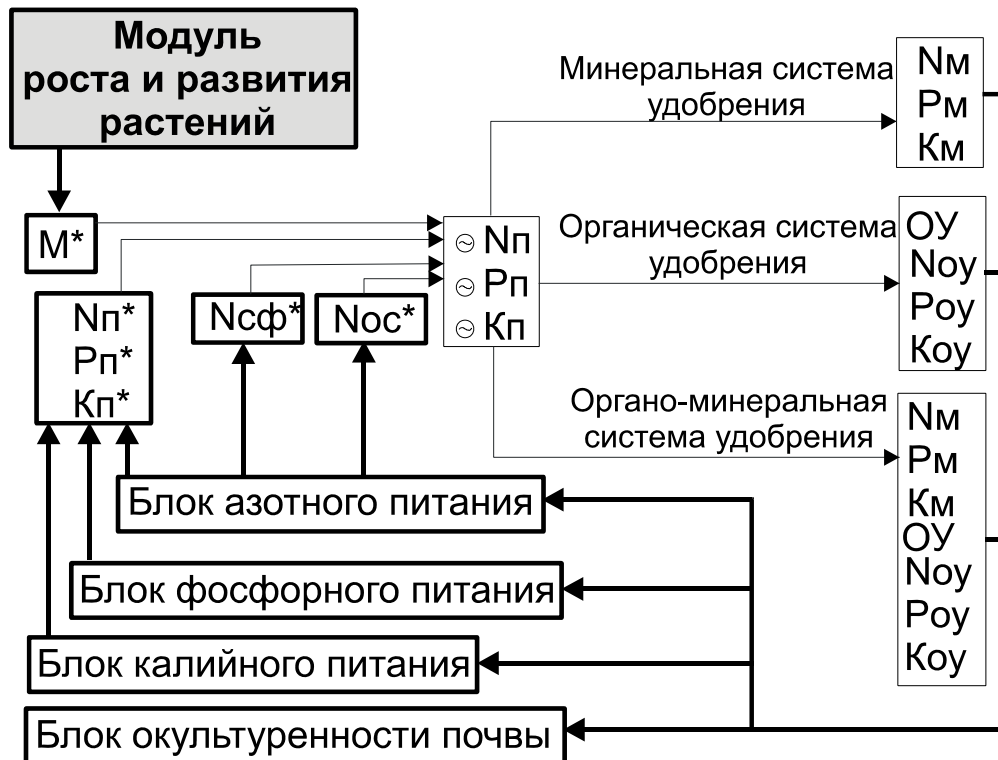


Рис. 66. Структурная схема блока расчета доз удобрений:
 ————— — внешние связи; ————— — внутренние связи;
 * — предикторы модуля

По этим предикторам вычисляется дефицит элементов Θ_N , Θ_P , Θ_K , который следует восполнить путем внесения удобрений. Тип системы удобрений выбирается пользователем в зависимости от биологических особенностей культуры, принятой системы земледелия и финансовых возможностей хозяйства. Модель предусматривает три системы удобрений: минеральная, органическая или органо-минеральная. Выходные данные — доза органического удобрения O_y , доза NPK минеральных (N_m , P_m , K_m) и органических (N_{oy} , P_{oy} , K_{oy}) удобрений — поступает на вход блоков азотного, фосфорного, калийного питания и окультуренности почвы для последующего вычисления функций оптимальности и корректировки уровня урожайности с учетом вносимых удобрений.

Расчет дозы кальция для доведения кислотности почвы до оптимального для конкретной культуры значения выполняется по формулам [4]:

- песчаная почва $X_{Ca} = 1,0 \cdot 4,0 - 3,5 (pH/4,0) + G_{um}/1,5$;
- супесчаная почва $X_{Ca} = 1,1 \cdot 4,0 - 4,0 (pH/4,0) + G_{um}/1,5$;
- легкосуглинистая почва $X_{Ca} = 1,4 \cdot 4,0 - 4,0 (pH/4,0) + 1,1 G_{um}/1,5$;
- среднесуглинистая почва $X_{Ca} = 1,6 \cdot 4,0 - 5,3 (pH/4,0) + 1,3 G_{um}/1,5$;
- тяжелосуглинистая почва $X_{Ca} = 2,1 \cdot 4,0 - 6,5 (pH/4,0) + 1,3 G_{um}/1,5$,

где X_{Ca} — доза кальция, т·га⁻¹;

G_{um} — содержание гумуса в почве, %.

На основании уравнений формируется блок расчета дозы Ca (рис. 67), на вход которого подаются тип почвы (из базы данных), кислотность pH и содержание гумуса в почве (с блоков кислотности и окультуренности почвы соответственно).

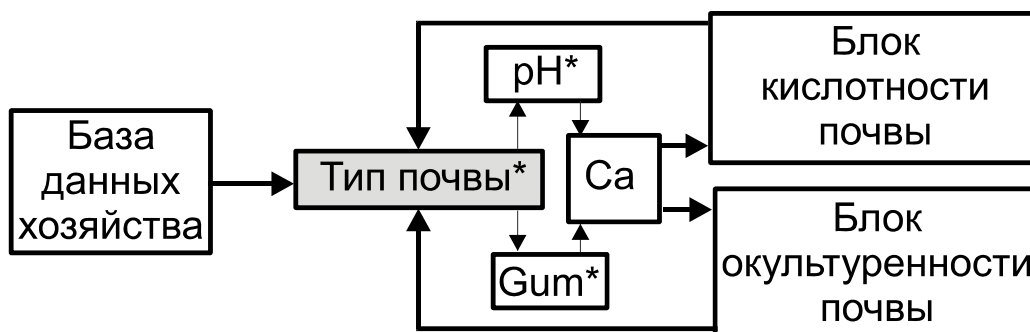


Рис. 67. Структурная схема блока расчета дозы кальция:

→ — внешние связи; → — внутренние связи;

* — предикторы модуля

Выходной параметр — доза кальция Ca — подается на блок кислотности почвы для дальнейшей корректировки урожайности по оптимальности этого параметра и на блок окультуренности почвы для корректировки балла окультуренности почвы, повторного расчета функции оптимальности и корректировки урожайности.

Таким образом, почва — это очень сложная и своеобразная среда, представляющая собой систему, в состав которой входит огромное количество параметров, постоянно изменяющихся в пространстве и времени. Это обуславливает необходимость создания многопараметрических динамических моделей, что чрезвычайно осложняет задачу моделирования химических процессов как внутри почвы, так и подсистемы «корни – почва». Из-за этой сложности количественное описание процессов, определяющих плодородие почвы, сводится к упрощенной трактовке, то есть содержанию и динамике в ней N , P_2O_5 , K_2O , pH , гумуса, основных микроэлементов и некоторых других показателей.

Контрольные вопросы

1. Какое значение имеют элементы минерального питания в жизни растения и формировании урожая?
2. Как рассчитать прогноз содержания органических и минеральных веществ в почве?
3. Принципы и методика разработки малопараметрической модели третьего и четвертого уровней продуктивности.
4. Какими методами производится регулирование химического состава почвы?

8. ОСНОВЫ СИСТЕМНОЙ ЭКОЛОГИИ

8.1. Объект, метод и задачи системной экологии

В настоящее время считается, что *экология* — это наука, изучающая совокупность живых организмов, взаимодействующих друг с другом и образующих с окружающей средой обитания некое единство, в пределах которого осуществляется процесс преобразования (трансформации) энергии и органического вещества.

Любая наука должна базироваться на трех составляющих: объекте изучения, методе изучения и решаемой задаче. Поскольку экология имеет фундамент в виде этих «трех китов», она вполне заслуживает статуса науки.

Объектом изучения экологии является *экосистема* (или, при наличии антропогенного фактора, — *агроэкосистема*), то есть устойчивый комплекс популяций растений, животных, микроорганизмов и населяемой ими территории, включая прилегающий слой атмосферы, а также подстилающий почву грунт или грунтовые воды, если они активно взаимодействуют с почвой, водной массой или с организмами.

Процесс изучения экосистемы ведется при помощи следующих методов: полевые наблюдения, эксперимент и моделирование, последовательное использование которых является обязательным, если исследователь претендует на полноту данных по изучаемому объекту.

Полевые наблюдения — это непосредственные наблюдения изучаемой экосистемы или определенных ее компонентов в естественных условиях при невмешательстве человека. Например, можно изучать динамику прироста биомассы растения, динамику численности популяций насекомых или микроорганизмов и на основе этих наблюдений выделять основные факторы, на которые следует воздействовать, чтоб достичь заданного результата. Потом можно перейти к следующему этапу.

Эксперимент. На этом этапе исследователь пытается сознательно действовать на те или иные факторы экосистемы, тем самым обеспечивая определенные их изменения. Например, если наблюдением установлено, что динамика прироста биомассы растений зависит от динамики азотного питания, то целесообразно попытаться изменить режим питания с помощью различных доз азотных удобрений, дробного внесения азота, сроков подкормок и др. В результате получим ответ на вопрос, что происходит, если..., то есть вы-

ходом любого направления эксперимента должно быть моделирование того или иного уровня сложности. Причем важна не констатация факта, а, по возможности, ответ на вопрос: почему? Почему тот или иной процесс идет так, а не иначе? Почему азотная подкормка в фазу кущения повышает урожайность? Конечно, ответ на бесчисленные «почему?» может и не найтись, ведь все зависит от уровня изученности проблемы. Тогда приходится ограничиваться регрессионными моделями, рассчитанными по фактически полученному результату без объяснения причин, его вызвавших. Естественно, это накладывает определенные ограничения на модель.

Иными словами, моделирование — упрощение естественной системы с целью получения модели, свойства и поведение которой оставались бы достаточно сходными с оригиналом.

В нашем примере, если с помощью уравнений описать зависимость прироста биомассы органов растения от уровня азотного питания в ту или иную фазу развития, да еще реализовать эту модель на компьютере, то можно добиться желаемого изменения биомассы путем изменения динамики азотного питания намного быстрее и дешевле, чем проводя полевые эксперименты.

С помощью указанных методов исследования реализуется *системный подход* изучения экосистемы (или агроэкосистемы) и решаются три основные задачи:

- 1) определение образующих экосистему *составных частей* и взаимодействующих с ней объектов окружающей среды (рис. 68);

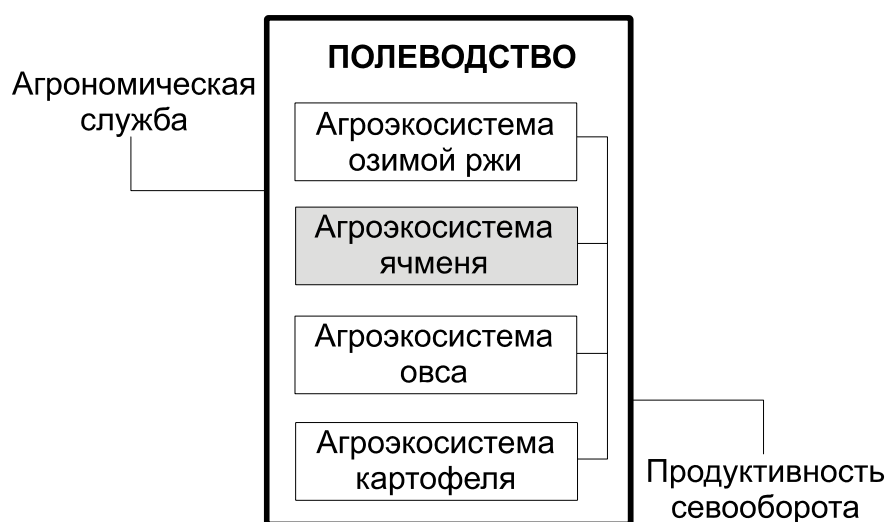


Рис. 68. Структурная схема системы полеводства

- 2) установление *структуры* экосистемы, то есть совокупности внутренних связей и отношений между составными частями, а также внешних связей между данной экосистемой и окружающей средой;
- 3) нахождение *функции* экосистемы, определяющей характер изменения компонентов экосистемы и связей между ними под действием внешних объектов.

8.2. Уровни агрегирования состава при изучении экосистем

Изучать, а тем более моделировать одновременно всю экосистему чрезвычайно трудно, поэтому обычно используется тот или иной уровень *агрегирования*, то есть *группировки объектов*. Поясним это на примере.

Для изучения агроэкосистемы ячменя (рис. 69) исследователю надо быть специалистом практически во всех областях науки. Это, естественно, невозможно. Поэтому каждый специалист изучает один или несколько объектов, применяя определенный уровень агрегирования.

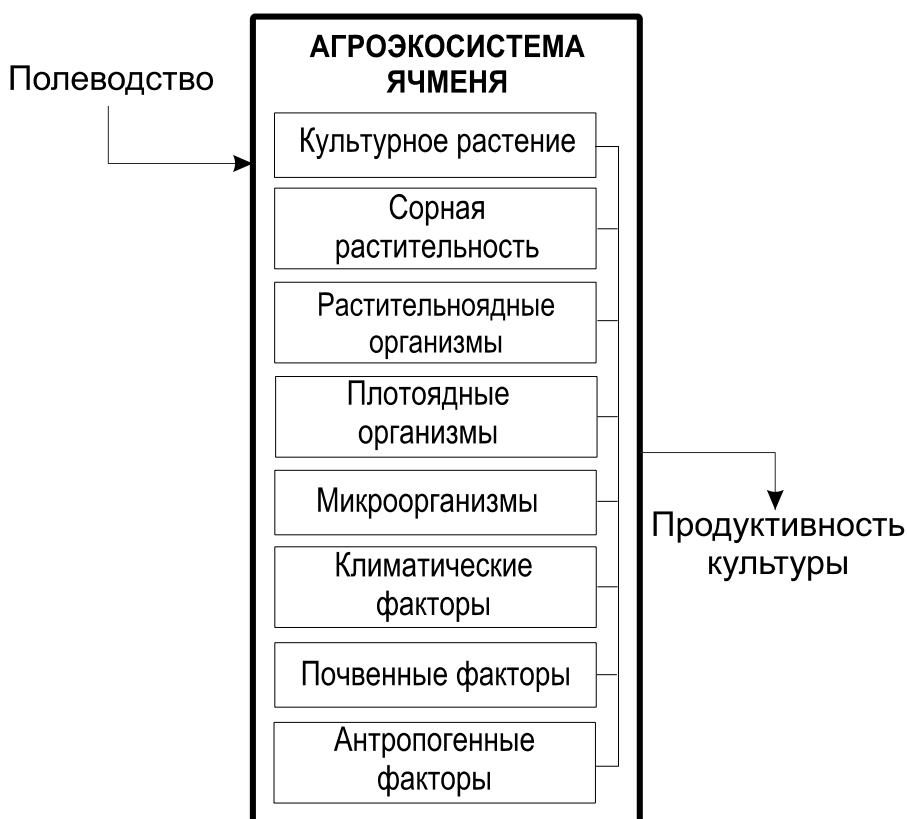


Рис. 69. Структурная схема агроэкосистемы ячменя

Всю экосистему можно разделить на две части: *биотоп* (неживые компоненты) и *биоценоз* (живые компоненты) (рис. 70).



Рис. 70. Структурная схема агрегирования агроэкосистемы ячменя

Каждую часть можно изучать отдельно от другой, представляя ее как систему более низкого уровня. В биотоп (в литературе часто — «абиотические факторы») входят солнечная энергия, не связанная физиологически вода, лишенный живых организмов воздух, минеральная часть и гумусовые вещества почвы. Таким образом, биотоп тоже является *системой*, поэтому для него характерны все системные признаки (состав, структура и функция) (рис. 71).



Рис. 71. Структурная схема биотопа агроэкосистемы ячменя

Биоценоз определяется как *совокупность всех популяций биологических видов, принимающих постоянное или периодическое существенное участие в функционировании данной экосистемы.*

Структурная схема биоценоза представлена на рисунке 72.

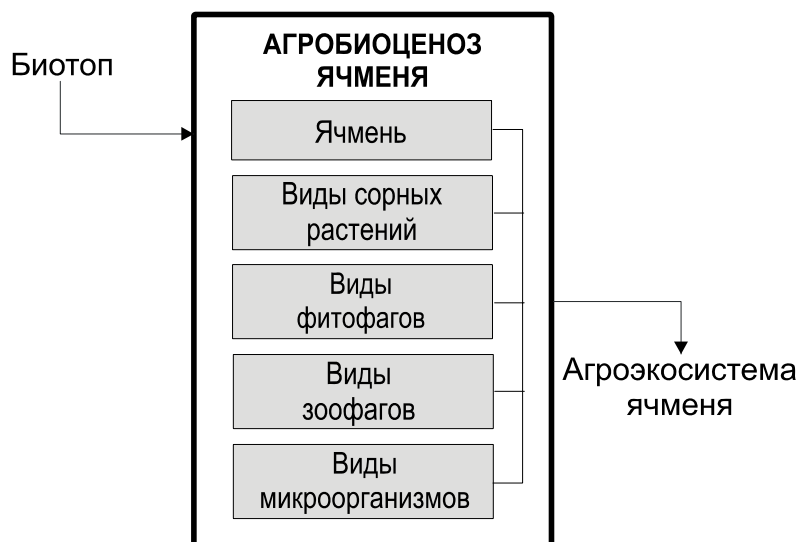


Рис. 72. Структурная схема биоценоза агроэкосистемы ячменя

В каждый момент времени биоценоз имеет определенное *видовое богатство*, которое измеряется числом входящих в него видов, и *количественный состав*, характеризующийся количеством экземпляров каждого вида. Количественный состав является обратной функцией от видового богатства, то есть чем более разнообразен видовой состав биоценоза, тем меньше количество особей каждого вида. В результате взаимодействий видов происходит изменение их численности (или динамика) с течением времени.

Следующий уровень агрегирования, когда изучается только часть видов, так или иначе существенно связанная с одним видом, называется консорцией (рис. 73).

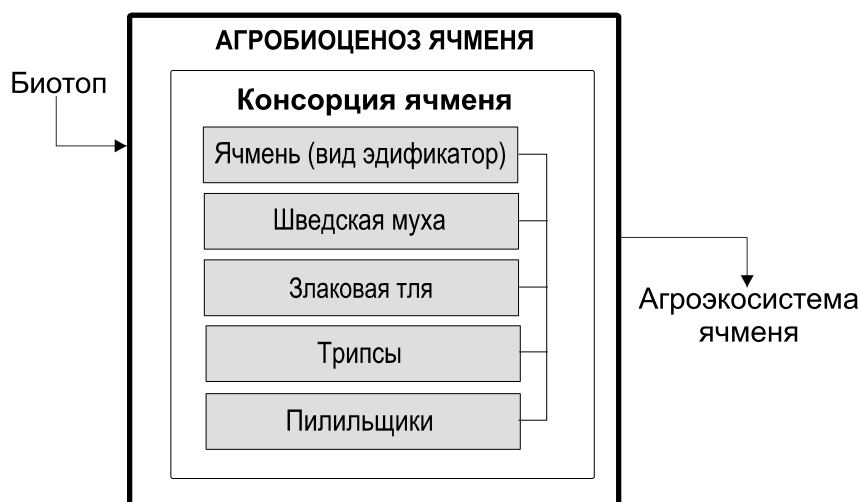


Рис. 73. Структурная схема консорции ячменя

Современное понятие консорции было сформулировано рядом ученых: В.Н. Беклемишев, Л.Г. Раменский, В.В. Мазинг. По их определению, *консорцией* называется совокупность видов, связанных пищевыми или прочими связями с некоторым видом, называемым эдификатором (или детерминатором) консорции, в качестве которого обычно выступает растение-автотроф.

В нашем примере консорцией можно назвать ячмень (вид-эдификатор) со всеми организмами (шведские мухи, тли, трипсы, пилильщики), связанными с ним и между собой трофическими, вещественными, информационными и энергетическими связями. Это переплетение связей и обеспечивает возможность трансформации или даже круговорота веществ в этой структурной единице биоценоза. Благодаря наличию таких связей, все организмы консорции зависят друг от друга.

Часто изучается группа видов, обитающая на каком-либо органе растения. Такая группа видов, использующая один и тот же класс ресурсов одинаковым способом, называется *гильдией*. Она отличается от консорции тем, что в последней разные виды используют один и тот же класс ресурсов разным способом. В нашем примере (рис. 74) в гильдию можно объединить виды, питающиеся наливающимися зерновками ячменя, то есть злаковую тлю и трипсов.

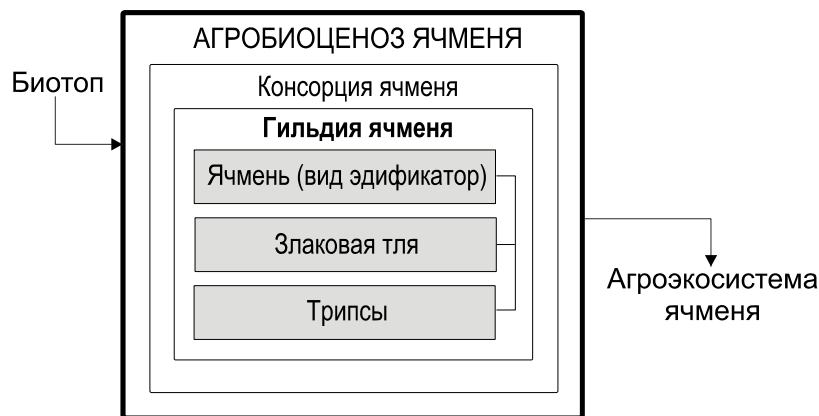


Рис. 74. Структурная схема гильдии ячменя

Если изучаются взаимосвязи только двух видов, один из которых служит пищей другому, такое объединение называется *стацией* (рис. 75). Название станции дается обычно по виду-эдификатору. Например, можно изучать динамику тлей в ячменной станции, где учитывается, с одной стороны, зависимость динамики численности тлей от обеспеченности их пищей (зерновками), а с другой стороны — зависимость массы зерновки (и в конечном счете урожайности) от численности тлей.



Рис. 75. Структурная схема станции ячменя

Многие исследователи занимаются изучением какого-либо одного вида. Такой уровень изучения называется *популяционным* (рис. 76).

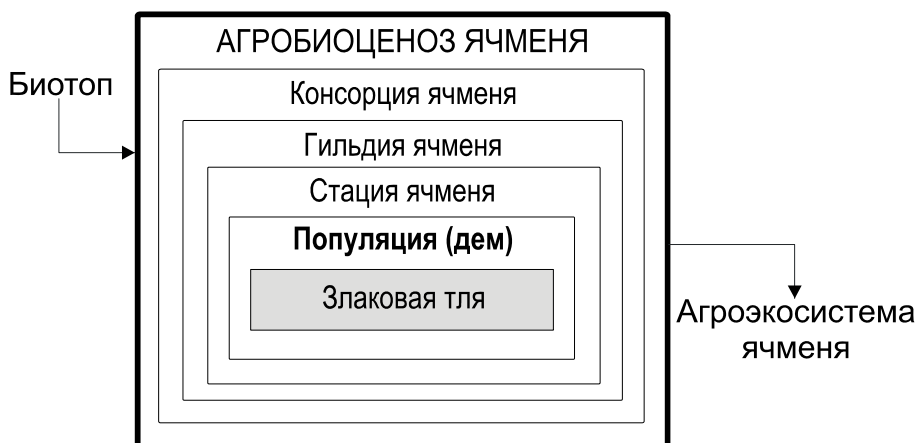


Рис. 76. Структурная схема популяции (дема) злаковой тли

Популяция — это совокупность особей одного вида, в течение продолжительного времени населяющих определенную территорию, связанных между собой теми или иными связями и достаточно изолированных от других таких же совокупностей.

Большинство агроэкосистем характеризуется кратковременным существованием. Такие *кратковременные* (одно-, двухлетние), а следовательно, неустойчивые *объединения* называются *демами*. Например, если изучать трипсов в агроэкосистеме ячменя, то самцы, самки, личинки и нимфы, входящие в состав этого объединения, будут называться *дем трипсов*. Если же трипсов изучать в многолетней природной экосистеме, то это будет уже популяция.

Дальнейшее дробление популяции приведет к отдельному организму данного вида, именуемому *особью*. Но изучение объекта на уровне особи в агрономии используется чрезвычайно редко, так как часто не дает возможности перенести полученные знания на всю популяцию в целом.

Изучать отдельные особи целесообразно, если у них ярко выражены отклонения от нормы. Например, патологические отклонения под действием неблагоприятных факторов, в частности, радиоактивного излучения, вызвавшего мутации.

В целом, объектом изучения экологии являются экосистемы, основная структурная единица которых — популяция.

8.3. Причины группировки особей в популяции

Причины, которые заставляют особи группироваться на ограниченных участках, многочисленны и разнообразны. Главная среди них — неравномерность распределения экологических условий (или факторов) в географическом пространстве и в сходстве требований к этим условиям у организмов одного вида.

Знание этих факторов настолько важно, что для их изучения из экологии выделен специальный раздел — *факториальная экология*, предметом которой является изучение воздействия экологических факторов на метаболизм, питание, скорость развития, плодовитость, продолжительность жизни, смертность и другие показатели жизнедеятельности особей популяции.

Экологические факторы — это такие свойства компонентов экосистемы и характеристики ее внешней среды, которые оказывают непосредственное влияние на особей данной популяции, а также на характер их отношений друг с другом и с особями других популяций.

В связи с этим широким определением задача классификации экологических факторов очень сложна. До сих пор нет общепринятого варианта. Тем не менее, достигнуто соглашение о классификации факторов по определенным признакам.

I. По отношению к данной экосистеме:

- внешние (экзогенные или энтопические). *Действуют на экосистему, но не испытывают обратного влияния экосистемы.* К ним относятся солнечная радиация, интенсивность осадков, скорость ветра (если эти факторы действуют над посевом);
- внутренние (эндогенные). *Действуют на свойства самой экосистемы и испытывают обратное ее действие.* Это численность и биомасса популяций, запасы различных веществ, характеристики приземного слоя воздуха, почвы и т.д.

II. По отношению к живому веществу:

- биотические. Факторы, *характеризующие свойства живого вещества*. Это скорость размножения популяций, количество откладываемых яиц и т.д.;
- абиотические. Факторы, *характеризующие свойства неживых компонентов экосистемы* (плотность почвы, запас влаги, содержание NPK и т.д.)

III. По отличительным свойствам экосистемы и внешней среды, специфическое влияние которых они характеризуют:

- *экзогенные*: климатические, геологические, гидрологические, миграционные, антропогенные;
- *эндогенные*: микрометеорологические, почвенные, водные, биотические.

IV. По динамике времени:

- суточная, лунная, сезонная, многолетняя.

V. По сохранности (суммативности или аддитивности):

- *ресурсы*. Численность, биомасса, запасы различного рода вещества и энергии, временные изменения которых подчиняются законам сохранения массы и энергии;
- *нересурсные*. Интенсивность и спектральный состав радиации, уровень шума, скорость и направление ветра, размер и форма пищи и другие, не подчиняющиеся закону сохранения массы и энергии.

VI. По степени воздействия на организмы:

- существенные (императивные), *вызывающие качественное изменение экосистемы* (вырубка леса, скашивание травостоя и др.);
- несущественные, *не вызывающие качественного изменения экосистемы* (однократный проезд транспорта по посеву, очаговое незначительное полегание посевов и др.)

В наземных экосистемах, с которыми агроном чаще всего имеет дело, из числа *экзогенных императивных факторов* выделяют следующие:

- 1) интенсивность солнечной радиации;
- 2) температура и влажность воздуха;
- 3) интенсивность атмосферных осадков;
- 4) скорость ветра;
- 5) скорость заноса спор, семян и других зародышей или притока взрослых особей разных видов из других экосистем;
- 6) антропогенные воздействия.

Эндогенные императивные факторы, которые отмечаются в наземных экосистемах, объединяются в три группы:

- 1) *микрометеорологические* — освещенность, температура и влажность приземного слоя воздуха, содержание в нем углекислого газа и воды;
- 2) *почвенные* — температура, влажность, аэрация почвы, физико-механические свойства, химический состав, содержание гумуса, доступность элементов минерального питания, окислительно-восстановительный потенциал;
- 3) *биотические* — плотность популяций разных видов, их возрастной и половой состав, морфологические, физиологические и поведенческие характеристики.

8.4. Пища

как главный популяционно-динамический фактор

Среди экологических факторов исключительная роль принадлежит *пищевым* (или *трофическим*) факторам. В зависимости от типа питания выделяют две группы организмов: автотрофы и гетеротрофы.

Автотрофы (продуценты) сами синтезируют необходимые им органические вещества, используя абиотические внешние источники энергии и минеральные вещества, поглощенные из окружающей среды. Если источником энергии служит солнечный свет, то они называются *фотоавтотрофами*. Типичные представители — зеленые растения и фотосинтезирующие бактерии. Организмы, которые получают энергию путем окисления разнообразных неорганических соединений, называются *хемоавтотрофами*. Это различные виды бактерий (серобактерии, ферробактерии и др.).

Гетеротрофные (консументные) организмы не способны использовать энергию абиотических источников для синтеза сложных органических соединений и пользующиеся энергией, накопленной автотрофами. К консументам относятся все животные, грибы, актиномицеты, большинство бактерий, некоторые водоросли и бесхлорофильные высшие растения.

Классификация консументов разработана достаточно хорошо для того, чтобы можно было выделить три основные группы.

1. Фитофаги (консументы 1-го порядка) — растительноядные организмы, питающиеся за счет органического вещества продуцентов.

2. Зоофаги (консументы 2-го и следующих порядков) — плотоядные организмы, питающиеся за счет органического вещества консументов более низкого порядка.

3. Детритофаги (биоредуценты) — организмы, питающиеся отмершими остатками продуцентов и консументов.

Существуют и комбинации этих основных типов питания.

4. Зоофитофаги.

5. Детритофитофаги.

6. Детритозоофаги.

7. Эврифаги — *всеядные организмы*.

Кроме типичных авто- и гетеротрофов существует значительное число видов со смешанным типом питания.

Влияние пищи на популяционно-динамические характеристики видов проявляется как через *качественный* состав, так и через *количественные* показатели ее обилия и доступности. Обилие и доступность не вызывают затруднений с пониманием, поэтому на этих показателях мы останавливаться не будем. Что же касается качества пищи, то здесь необходимо дать некоторые пояснения.

Качество пищи для автотрофов заключается в достаточном обеспечении их солнечной энергией и минеральными элементами. При отсутствии или нарушении того или иного фактора нарушаются процессы жизнедеятельности.

Для животных пища должна иметь определенную калорийность и определенный качественный состав (белки, жиры, углеводы, витамины, микроэлементы и т.д.). Причем требования к пище меняются в зависимости от состояния организма (возраст, упитанность и т.д.), времени года и погодных условий. В зависимости от предпочитаемого животным организмом корма А.А. Шорыгин [6] выделяет три вида пищи: 1) излюбленная; 2) заменяющая; 3) случайная. В зависимости от качества пищи плотность популяции будет в первом случае возрастать, во втором — оставаться на довольно стабильном уровне, в третьем — сокращаться. Наиболее характерно такое разделение пищи для монофагов (организмов, питающихся одним видом корма). Например, популяция колорадского жука процветает при питании картофелем (излюбленная пища), находится в довольно угнетенном состоянии при питании другими видами пасленовых (*Solanaceae*) и полная депрессия наступает при вынужденном питании растениями других семейств. У олигофагов (питающихся ограниченным набором видов пищи) заменяющая пища в отдельных случаях может быть необходимой для нор-

мальной жизнедеятельности. Например, известно, что для сохранения максимальной плодовитости ячменная шведская муха хотя бы один раз в 2...3 поколения должна развиваться на дикорастущих мятликовых, то есть пользоваться заменяющей пищей.

В связи с вышесказанным *основной задачей* факториальной экологии является *построение и исследование моделей, учитывающих экологические факторы, действующие на изменение величин изучаемых показателей жизнедеятельности организма в зависимости от всех экологических факторов*. Поясним это довольно сложное для понимания определение на простом примере. Предположим, мы изучаем действие азотного питания на площадь листьев ячменя. Если же в модель дополнительно ввести фосфорное и калийное питание, осадки, температуру почвы и воздуха, активность микрофлоры, действие вредоносных объектов и других факторов, то работа ее будет более точно отражать реальный объект.

Экологическая ниша

Если взять весь комплекс экологических факторов, необходимых для существования вида, это и будет экологическая ниша. Но это определение не учитывает количественного значения факторов, а потому может использоваться только в вербальных моделях типа: «растению необходим свет, минеральное питание и вода». Количественное значение факторов можно выразить через так называемую *функцию благополучия* (или *жизненности*) популяций.

Значения ее изменяются вдоль некоторой шкалы, представляющей собою то или иное сочетание количественного значения факторов (рис. 77).

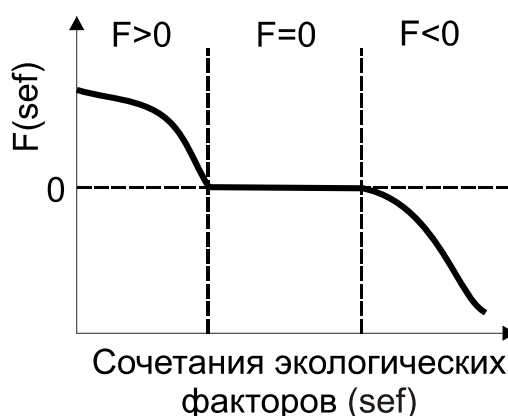


Рис. 77. Функция благополучия популяции:
 $F > 0$ — популяция процветает;
 $F = 0$ — популяция в равновесии;
 $F < 0$ — популяция угнетается (вытесняется)

При значении функции благополучия выше нуля $F > 0$ популяция *процветает*, то есть увеличивает численность, успешно противостоит всем неблагоприятным воздействиям, быстро восстанавливая свою численность.

При $F = 0$ она находится в *состоянии равновесия*, выжидая, как изменится значение факторов, не увеличивая и не сокращая численность.

При $F < 0$ наблюдается *угнетение* популяции или *гибель* (в зависимости от продолжительности действия угнетающего фактора).

Естественно, что устойчивое существование популяции возможно не при всех комбинациях экологических факторов, поэтому необходимо определить область значений экологических факторов, в которой возможно длительное существование вида. Эта область экологического пространства (значений экологических факторов) и есть *экологическая ниша*. Поскольку каждый вид обладает своей экологической нишей, отдельные значения факторов которой совпадают с нишами других видов, между видами начинается борьба за выживание. Причем ни один вид в любом случае не останется в одиночестве, так как вытеснить все остальные он не сможет. В результате возникает компромисс: одна популяция будет процветать, а другая находиться в угнетенном состоянии, но обе они будут существовать. Отсюда вытекает необходимость выделения двух типов экологических ниш: *фундаментальная*, которая отражает потенциальные свойства популяции, запрограммированные ее генотипом, и *реализованная*, которая определяется фенотипом популяции (рис. 78).

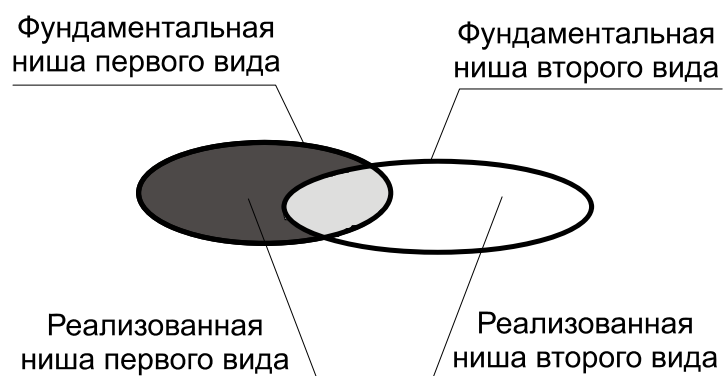


Рис. 78. К понятию экологической ниши

Условия «развертывания» реализованной ниши в фундаментальную зависят от внутренних (специфика онтогенеза) и внешних факторов окружающей среды, которая выступает по отношению к

популяции как *система*. Такая различная степень соответствия внутренних и внешних факторов в пространстве и времени позволяет выделять и анализировать частные ниши видов.

Практическое применение понятия «экологическая ниша» рассмотрим на следующем примере. В агроэкосистему ячменя одним из компонентов входят сорные растения (возьмем марь белую и бодяк полевой). И культуры и сорные растения стремятся занять одну и ту же экологическую нишу, так как биологические требования у них в целом совпадают. В результате между ними возникает конкурентное взаимодействие, заканчивающееся или вытеснением ячменя и марь белой, как менее конкурентоспособных видов, или существованием всех видов, но в меньшей численности по отношению к потенциальной. Но мы заинтересованы в получении полезной продукции, следовательно, хотим дать преимущество ячменю. Для этого надо изменить значение какого-либо фактора внешней среды. И таким фактором являются гербициды. Гербицид уменьшает реализованную нишу для сорных растений и, следовательно, увеличивает реализованную нишу для ячменя.

Контрольные вопросы

1. Объект, метод и задачи системной экологии.
2. Состав, структура и функции экосистемы, уровни агрегирования состава при изучении экосистем.
3. Что такое популяция и дем? Причины группировки особей в популяции.
4. Пища как главный популяционно-динамический фактор. Трофическая пирамида.
5. Как применить экологическую нишу объекта в регулировании экологических взаимодействий организмов агроэкосистемы?

9. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ БИОЦЕНОЗА

9.1. Динамика популяций

Системная экология изучает популяции как самостоятельные подсистемы в рамках экологической системы, объединяющей их с абиотическими компонентами в единое целое. Следуя далее методологии системного подхода, у каждой популяции можно выделить основные системные атрибуты: состав, структуру и функционирование.

Например, разбив популяцию на группы самок и самцов, получают *состав популяции*. При этом *структура популяции* будет состоять из всевозможных отношений между половыми группами (отношения размножения, питания, поведения и т.д.). Внешняя структура представляет собой совокупность связей половых групп с другими популяциями и абиотическими компонентами, а под *функционированием* подразумевается все множество преобразований, осуществляющихся в экосистеме обоими полами указанной популяции.

Изменение плотности популяции происходит в результате взаимодействия четырех процессов: *размножение, гибель, иммиграция, эмиграция*.

Вычисление плотности популяции $X_{(tk+1)}$ в расчете модели

$$X_{(tk+1)} = X_{(tk)} + (V_b - V_d) + (V_i - V_e) \Delta t,$$

где $X_{(tk)}$ — исходное значение плотности популяции;

V_b — скорость размножения;

V_d — скорость гибели;

V_i — скорость иммиграции;

V_e — скорость эмиграции;

Δt — интервал времени (шаг расчета).

Однако количественное описание функций скорости иммиграции и эмиграции связано с необходимостью учета свойств не только данной, но и граничащих с ней экосистем, а это затрудняет идентификацию функций V_i и V_e . Поэтому для упрощения динамики будем считать, что популяция изолирована и $V_i - V_e = 0$. В этом случае уравнение плотности популяции будет выглядеть как

$$X_{(tk+1)} = X_{(tk)} + (V_b - V_d) \Delta t.$$

В полевых условиях определить влияние процессов размножения и гибели на динамику популяций весьма затруднительно, поэтому вводится их результирующая — удельная скорость изменения популяции:

$$r = V_b - V_d.$$

Опыт изучения влияния факторов среды на рост популяций организмов разных видов показывает, что для независимой от плотности популяции компоненты r существует оптимальная комбинация факторов внешней и внутренней среды, при которой функция r принимает свое максимальное значение. Эта величина r^m для каждого вида организмов является важнейшей биологической характеристикой, отражающей способность популяции к увеличению численности при оптимальных экологических условиях. Эту величину принято называть *биотическим потенциалом* данного вида (Charman, 1928) [1] (рис. 79).

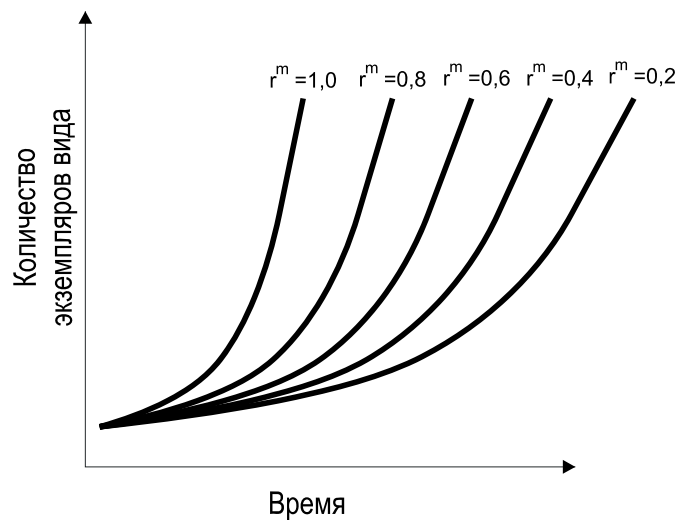


Рис. 79. Возрастание плотности популяций с разными биотическими потенциалами

Она рассчитывается по экспоненциальной функции

$$X_{(t_1)} = X_{(t_0)} e^{r^m(t_1-t_0)}.$$

Надо сказать, что чем крупнее организм, тем ниже его биотический потенциал.

Если бы условия среды сохранялись оптимальными постоянно, то прирост популяции шел бы в геометрической прогрессии непрерывно. Но ресурсы среды ограничены, поэтому рано или поздно экспоненциальный рост прекращается, так как r становится меньше r^m . Иными словами, при отклонении экологических факторов от оптимальных или достижении такой плотности популяции, когда становится существенным влияние зависящих от плотности факторов, рождаемость снижается, а смертность возрастает.

В результате плотность популяции поддерживается на некотором уровне, свойственном данной экосистеме. Этот уровень называется *емкостью среды* (рис. 80).

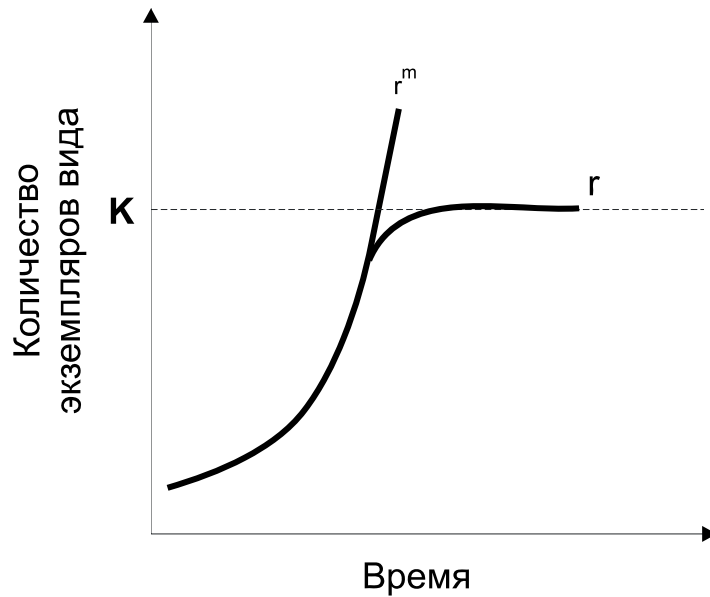


Рис. 80. Динамика плотности популяции, реализующей биотический потенциал r^m и ограниченная емкостью среды r

Таким образом, типичная в биологии и экологии форма динамики роста популяции представляет собой S-образную кривую.

Плотность популяции в среде с ограниченными ресурсами описывается уравнением, называемым логистическим (или уравнением Ферхюльста-Пёрла). Бельгийский ученый П. Ферхюльст применил это уравнение в 1838 году для описания динамики человеческого населения, а американский ученый Р. Пёрл в 1920 году широко использовал его для описания динамики биологических популяций. В своей аналитической форме уравнение записывается как

$$X_{(t)} = \frac{K}{1 + \frac{K - X_{(t_0)}}{X_{(t_0)}} e^{r^m(t-t_0)}}$$

где $X_{(t_0)}$ — начальное значение численности X при $t = 0$;

K — высота плато насыщения, к которому стремится $X_{(t)}$, определяемое емкостью среды;

r^m — биотический потенциал популяции.

Таким образом, применить это уравнение для прогноза можно, если предварительно выяснить зависимость X от K при различном сочетании факторов. Поскольку значения факторов в течение прогнозируемого периода изменяются, линия динамики плотности популяции может существенно отличаться от S-образной.

Несмотря на довольно хорошо разработанную методику расчета линии, вопрос прогнозирования динамики остается открытым. Существующие модели по наиболее вредоносным объектам (колардский жук, саранча, клоп-черепашка, непарный шелкопряд) нуждаются в детализации и уточнении.

В практике сельскохозяйственного производства агроном и консультант часто имеют дело с вредителями, болезнями и сорняками на полях, то есть в агроэкосистемах, где динамика этих объектов гораздо сложнее, нежели в естественных условиях. Но некоторые возможности прогнозирования все же имеются. Динамика численности насекомых и пауков зависит от энтальпии среды. Если взять ее как параметр времени и проводить периодические учеты плотности популяции в течение сезона, то получится ломанная линия, разделив которую на отрезки, можно подобрать к ним систему функций, описывающих динамику в целом.

9.2. Межвидовые взаимодействия компонентов биоценоза

При изучении популяций легко заметить, что плотность их в экосистеме изменяется с течением времени. Описание, объяснение и предсказание этих изменений относятся к важнейшим задачам экологии, имеющим не только теоретическое, но и практическое значение. Достаточно сказать, что прогноз динамики фитофагов гораздо точнее и реальнее, если ввести в него поправку на взаимодействие организмов. В этом случае получится система уравнений, в которые войдут дополнительные переменные:

$v_1 \dots v_k$ — глобальные внешние факторы экосистемы;

$\lambda_1 \dots \lambda_k$ — плотности всех популяций экосистемы;

$\beta_1 \dots \beta_k$ — абиотические свойства экосистемы.

В этом случае уравнение динамики изолированной популяции применительно к экосистеме переписется как

$$X_{(tk+1)}^j = X_{(tk)}^j + \left(V_{b(v_1 \dots v_k, \lambda_1 \dots \lambda_k, \beta_1 \dots \beta_k)}^j - V_{d(v_1 \dots v_k, \lambda_1 \dots \lambda_k, \beta_1 \dots \beta_k)}^j \right) + \\ + \left(V_{i(v_1 \dots v_k, \lambda_1 \dots \lambda_k, \beta_1 \dots \beta_k)}^j - V_{e(v_1 \dots v_k, \lambda_1 \dots \lambda_k, \beta_1 \dots \beta_k)}^j \right) \Delta t,$$

где j — популяция какого-либо вида.

Такая модель будет называться *экосистемной моделью* динамики популяции.

Если задать некоторые фиксированные значения глобальных внешних факторов экосистемы ($v_1 \dots v_k = \text{const}$) и абиотических свойств экосистемы ($\beta_1 \dots \beta_k = \text{const}$), то динамика будет зависеть только от плотности популяций компонентов биоценоза. Такая модель называется *биоценотической моделью* динамики популяций.

Рождаемость V_b и смертность V_d зависят от многих факторов, основными из которых являются биотические взаимодействия. Последние чрезвычайно многообразны, поэтому долгое время ни одна из предлагавшихся классификаций биотических отношений между видами, учитывающая реальные биотические механизмы, не получала всеобщего признания. Об этих попытках классификации М. Уильямсон писал так: «Если представить себе все огромное разнообразие возможных взаимодействий: химические, существующие, по-видимому, между бактериями и между планктонными водорослями, различные взаимодействия грибов с другими организмами, симбиоз грибов и водорослей в лишайниках, сукцессии растительных сообществ, связанные, в частности, с конкуренцией за солнечный свет и эволюцией почв, и, в особенности, поразительное разнообразие образа жизни животных, способов добывания пищи и т.п., то становится ясной полная безнадежность такого подхода. Простая классификация была бы наивной, ее несостоятельность выявилась бы при попытках найти место для конкретных примеров, тогда как всеобъемлющая классификация оказалась бы совершенно необозримой».

Частично преодолеть эти трудности оказалось возможным, когда взаимодействия стали классифицировать не по качественному разнообразию их механизмов, а по количественным эффектам, то есть по плотности популяций. В 50-е годы XX века была предложена следующая формальная процедура: каждой паре видов рассматриваемого сообщества присваивается комбинация из двух символов, каждый из которых может быть «+», «0» или «-», в зависимости от направления влияния численности одного на скорость роста другого вида. После этого проводится их классификация (табл. 3).

Таблица 3. Классификация взаимодействия двух видов биоценоза

Тип взаимодействия	Влияние	
	первого вида на второй	второго вида на первый
1. Нейтрализм	0	0
2. Аменсализм	-	0
3. Комменсализм	+	0
4. Конкуренция	-	-
5. Жертва-эксплуататор	+	-
6. Мутуализм	+	+

Нейтрализм (0, 0). Популяции двух видов связаны отношением нейтрализма, если они не оказывают непосредственного воздействия друг на друга. Такой тип взаимодействия наблюдается у организмов, использующих разные пищевые ресурсы. Например, колорадский жук, питающийся картофелем, и рапсовый цветоед, обитающий на сорной растительности семейства капустные.

Аменсализм (-, 0). К этому типу относятся межвидовые отношения самой различной природы, проявляющиеся в том, что один из видов взаимодействующей пары в биоценозе оказывает отрицательное воздействие на рост другого, хотя сам не испытывает существенного влияния с его стороны. Плотность популяции второго вида (аменсала) зависит от степени действия первого.

1. При *слабом ингибировании* система стремится к устойчивому стационарному состоянию, в котором численность аменсала будет меньше, чем при его свободном росте (рис. 81).

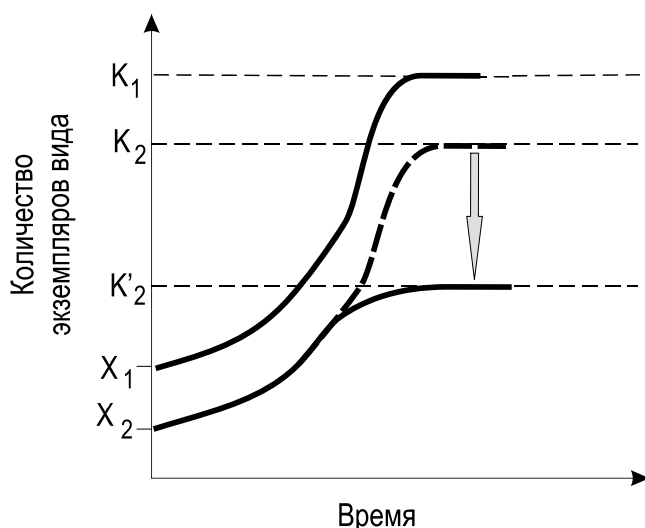


Рис. 81. Динамика плотности популяции аменсала при слабом ингибировании первым видом

2. При *сильном ингибировании* популяция аменсала полностью погибает (элиминируется) (рис. 82).

Типичный пример одностороннего отрицательного взаимодействия наблюдается между парами видов, представляющих различные царства органического мира. Например, между растениями и животными, растениями и микроорганизмами, между животными и микроорганизмами. Однако не исключен аменсализм и среди видов одного царства.

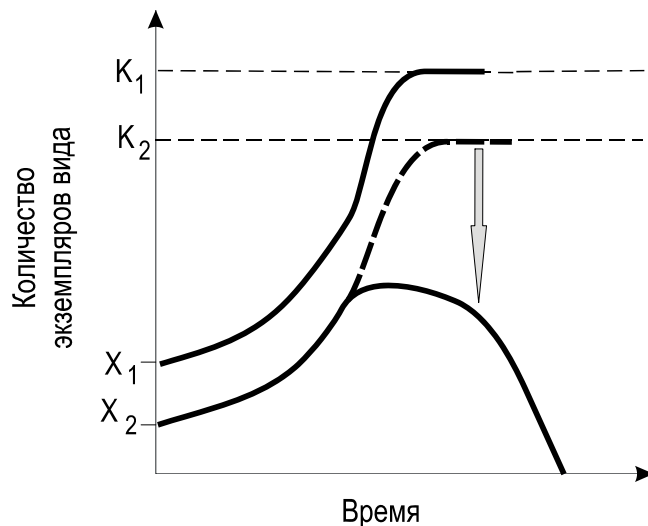


Рис. 82. Динамика плотности популяции аменсала при сильном ингибировании первым видом

Среди растений чаще всего наблюдается аллелопатическое действие первого вида на второй. *Аллелопатия* — это выделение в окружающее пространство специфических веществ, ингибирующих рост или препятствующих размножению других растений. Аменсализм между микроорганизмами заключается в выделении одними микробами антибиотиков, отрицательно действующих на другие микроорганизмы. Отношение аменсализма между растениями и микроорганизмами, когда угнетается микроорганизм, связано с выделением растением антимикробных токсинов (бактерицидов, фунгицидов и др.).

Таких примеров очень много, но самое важное значение имеет ингибирование нитрифицирующих бактерий в почвах под травянистой растительностью. Вследствие этого достигается экономия энергии и сохранение азота в почве, так как при заторможенном процессе нитрификации создаются резервы доступного растениям азота в виде аммонийных форм. Аммонийные формы сразу усваиваются растением, в то время как нитраты им приходится восстанавливать до аммония с затратой энергии. Сохранение азота в почве обусловлено меньшим его вымыванием.

Растения тоже могут быть аменсалами, то есть угнетаться при взаимодействии с микроорганизмами. Например, различные виды грибов из рода *Fusarium* выделяют микомаразмин и аспергилломаразмин — соединения, вызывающие у растений нарушение водного обмена.

Комменсализм (+, 0). К этой категории относятся разнообразные случаи отношений между двумя видами, когда первый вид, называемый «хозяином», положительно воздействует на второй, называемый «комменсалом» («нахлебником»), хотя последний не влияет на «хозяина».

Наиболее распространенная форма комменсализма — когда комменсал тем или иным способом получает пищу от хозяина, обеспечивая тем самым свое существование. Это может быть или питание остатками пищи хозяина, или продуктами его жизнедеятельности. Хозяин может предоставлять жилище, укрытие, место для прикрепления, переносить взрослые особи или зародыши комменсала. Так или иначе, в присутствии хозяина комменсал в большем объеме реализует свою экологическую нишу за счет повышения емкости среды (рис. 83) и система в стационарном состоянии устанавливается на уровне, превышающем максимальную численность при свободном росте комменсала.

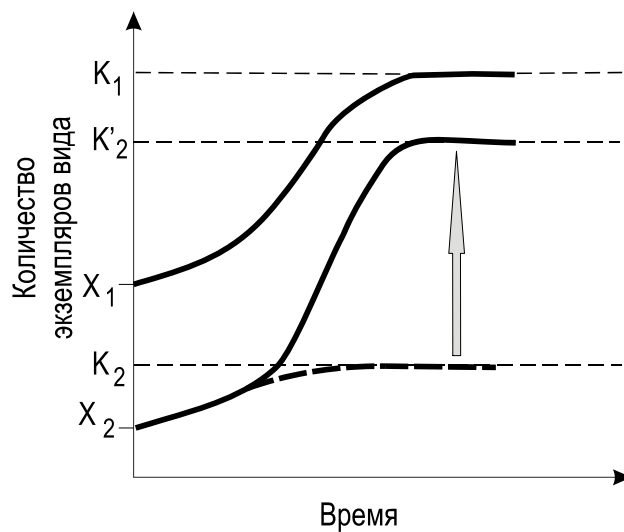


Рис. 83. Динамика плотности популяции при комменсализме

Поскольку растения — автотрофные организмы, постольку чаще они выступают в качестве хозяев. Например, на поверхности листьев и в прикорневой зоне обитают многочисленные организмы, перерабатывающие выделения растений.

Конкуренция (интерференция) (-, -). Конкуренцией называется любое взаимно отрицательное отношение между видами. Частными случаями конкуренции являются:

- конкуренция за тот или иной ограниченный ресурс (соперничество). Среди растений это соперничество за влагу и свет, между животными — за пищу;
- взаимное аллелопатическое ингибирование (антагонизм);
- непосредственная «борьба» между представителями разных видов (агрессия).

В результате вид, получающий какое-либо преимущество от среды обитания, полностью подавляет численность другого вплоть до полной элиминации. Не имея преимущества, виды существуют совместно. В зависимости от ситуации наблюдается один из следующих результатов.

1. Первый вид, как более сильный конкурент, всегда будет вытеснять второй независимо от начальных плотностей (рис. 84).

2. Второй вид, будучи более сильным конкурентом, вытесняет первый независимо от начальных плотностей (рис. 85).

3. Если виды одинаково конкурентоспособны, то независимо от исходных плотностей система приходит в устойчивое состояние (рис. 86).

4. Если емкости внешней среды не лимитируют рост плотности популяций видов, то исход конкуренции определяется начальным соотношением численности (рис. 87).

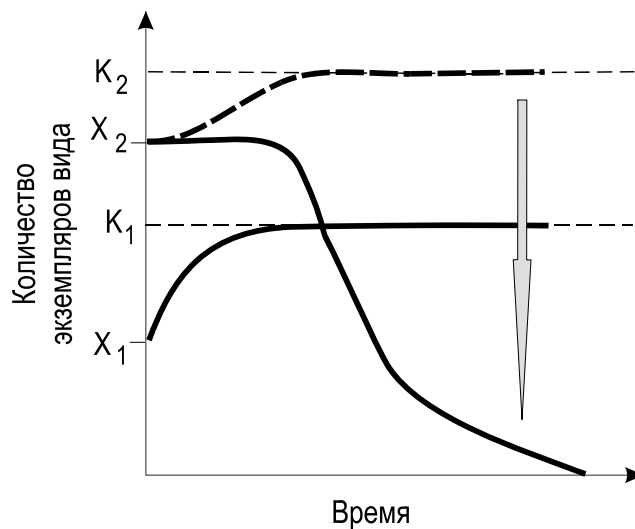


Рис. 84. Вытеснение более сильным конкурентом X₁ менее сильного X₂ независимо от исходной плотности

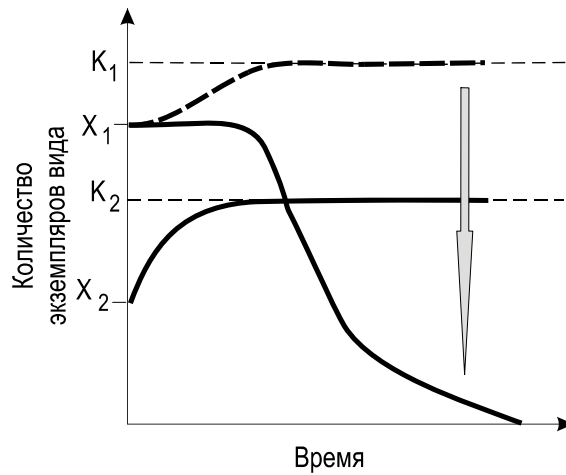


Рис. 85. Вытеснение более сильным конкурентом X_2 менее сильного X_1 независимо от исходной плотности

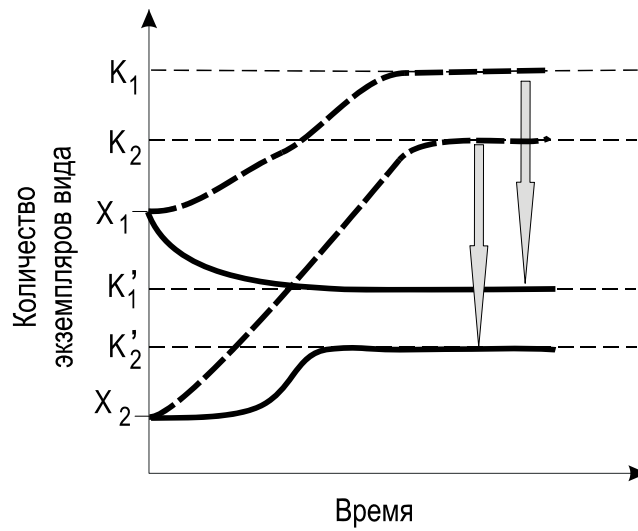


Рис. 86. Стабилизация системы при равной конкурентной способности видов

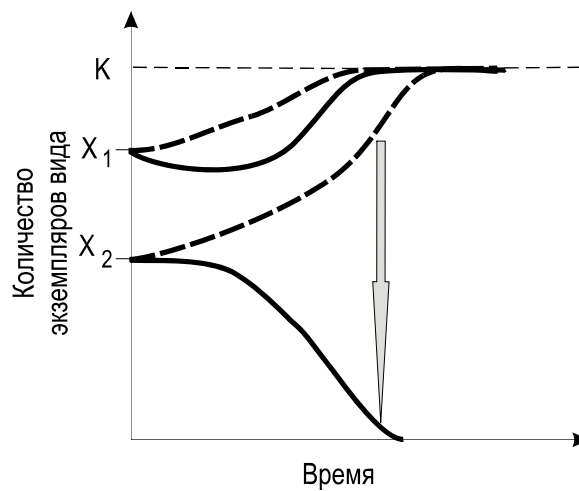


Рис. 87. Элиминация одного из видов при одинаковой конкурентной способности, но разной исходной плотности при отсутствии лимитирования

Таким образом, для обеспечения устойчивости конкурентного равновесия в системе, если оно возможно, достаточно, чтобы самоингибирование каждой из популяций было более сильным, чем взаимное подавление.

Жертва – эксплуататор (+, –). К этой категории биотических отношений принадлежат любые отношения между двумя видами, при которых увеличение (или уменьшение) плотности популяции первого («жертвы») влечет за собой увеличение (уменьшение) скорости роста популяции второго («эксплуататора»), тогда как увеличение второго вызывает уменьшение (увеличение) скорости роста популяции первого вида.

Самые важные отношения этого типа взаимодействия: растение и травоядное животное, жертва и хищник (в узком смысле этих терминов), хозяин и паразит.

Отношения «жертва – эксплуататор» широко распространены, а поэтому с давних пор привлекали внимание наблюдателей, исследователей и философов. В античные времена таковыми были Феокрыт, Аристотель, Плиний Старший (23-79 гг. н.э.). В Средневековье — Фридрих II Гогенштауфен (Барбаросса) (1194-1250), Альберт фон Бельштадт (1193-1280). В новое время — Ж.Л. Бьюффон (1707-1788), Эразм Дарвин и Чарлз Дарвин. Богатая история изучения взаимодействия «жертва – эксплуататор» позволяет вывести последовательность направлений исследований.

1. Все более полное описание совокупности пищевых связей между популяциями в биоценозе, образующих трофические сети.

2. Получение количественных оценок непосредственного участия травоядных, хищников, паразитов и сапрофитов в трансформации первичной биологической продукции, создаваемой автотрофными организмами.

3. Выяснение «регуляторной» роли эксплуатирующего вида.

В результате выявились следующие основные типы динамического поведения системы «жертва X_1 – эксплуататор X_2 ».

1. Вид эксплуататор не способен прокормиться за счет данной жертвы и со временем вымирает, а сама жертва после некоторого переходного процесса достигает определенной стационарной численности (рис. 88).

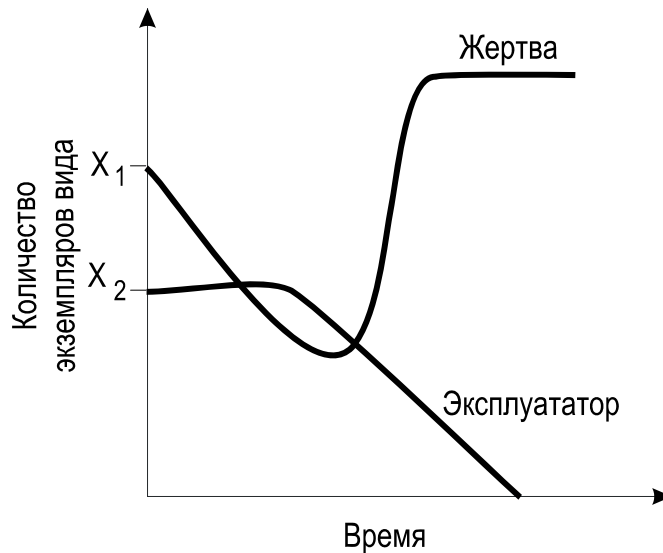


Рис. 88. Взаимодействие «жертва – эксплуататор» (вариант 1)

Типичный пример — применение биологического метода защиты растений, когда внедренный в экосистему хищник или паразит не способен существовать в сложившейся среде. Такая ситуация складывается при обработке посевов бактериальными препаратами в холодную погоду.

2. Вид эксплуататор слишком эффективен в поисках жертвы и быстро размножается, в результате чего он полностью истребляет жертву, после этого сам погибает от голода (рис. 89). Ситуация «козел в огороде» характерна для монофагов, используемых как средство биологической защиты растений.

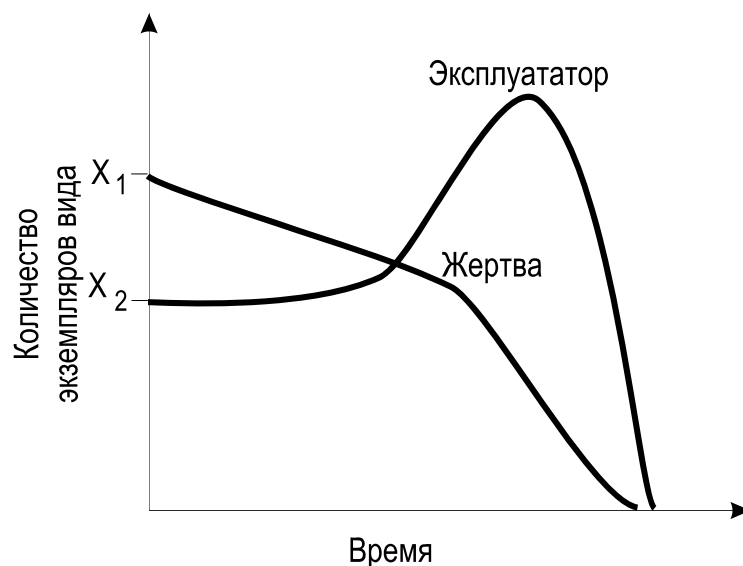


Рис. 89. Взаимодействие «жертва – эксплуататор» (вариант 2)

3. Существует единственная устойчивая комбинация плотностей жертвы и эксплуататора, и из любого начального состояния система «жестко» (без колебаний) переходит в стационарное состояние (рис. 90). Это ситуация, когда эксплуататор достаточно эффективен и может быстро снижать численность жертвы до низкого стационарного уровня, вблизи которого начинают действовать механизмы, препятствующие полному уничтожению жертвы. Классический пример — кактусовая огневка, интродуцированная в Австралию в 1925 году для защиты пастбищ от интенсивного распространения опунции. Стабилизация системы наступила через 5 лет (в 1930 г.) и в настоящее время размножение кактуса контролирует личинка этой бабочки.

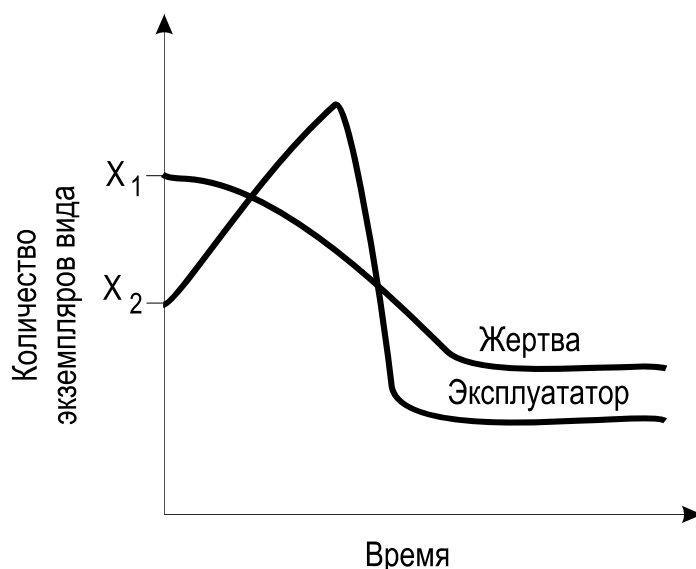


Рис. 90. Взаимодействие «жертва – эксплуататор» (вариант 3)

4. Существует единственная устойчивая комбинация плотностей популяций жертвы и эксплуататора, при котором из любого другого начального состояния после переходного процесса с затухающими колебаниями система стремится к своему стационарному состоянию, в котором жертва и эксплуататор могут устойчиво существовать неограниченно долго (рис. 91). Например, взаимодействие растений и копытных растительноядных животных.

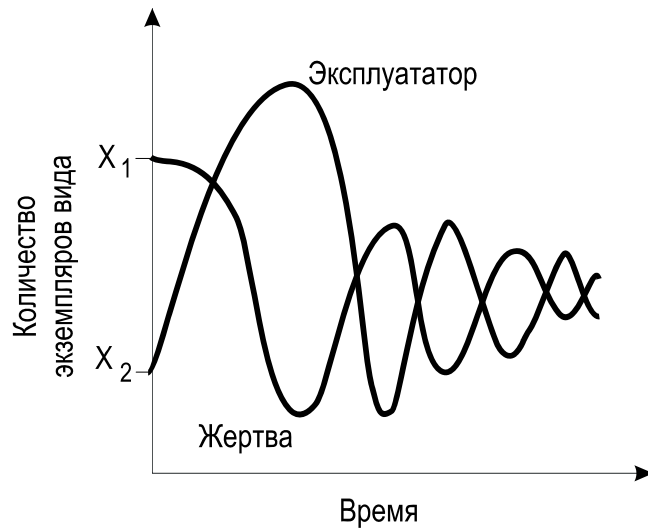


Рис. 91. Взаимодействие «жертва – эксплуататор» (вариант 4)

5. Из любого начального состояния траектория системы стремится к единственно замкнутой траектории, движение по которой осуществляется с периодом T (рис. 92).

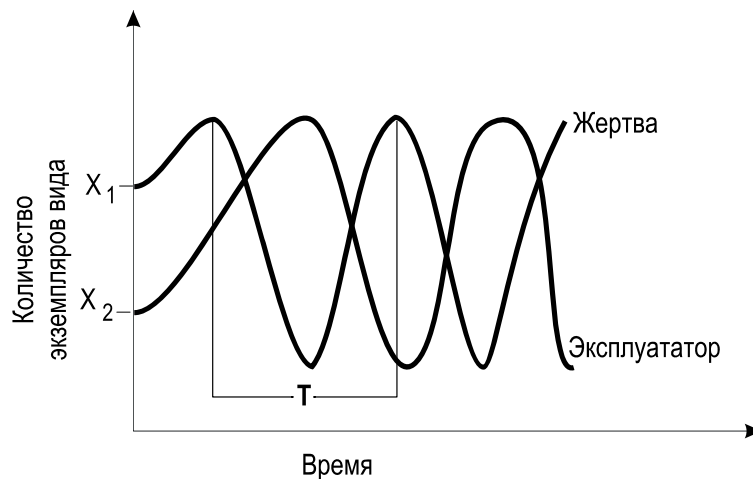


Рис. 92. Взаимодействие «жертва – эксплуататор» (вариант 5)

Синусоидальная траектория характеризует внутренне присущий данной системе колебательный режим (так называемые автоколебания). Такие автоколебания характерны для ненарушенных внешними факторами систем, где высокая степень саморегуляции.

Мутуализм (+, +). Отношением мутуализма между двумя видами называется взаимно положительное влияние, которое в конечном счете проявляется в том, что увеличение (снижение) численности любого из них вызывает увеличение (снижение) численности другого (рис. 93).

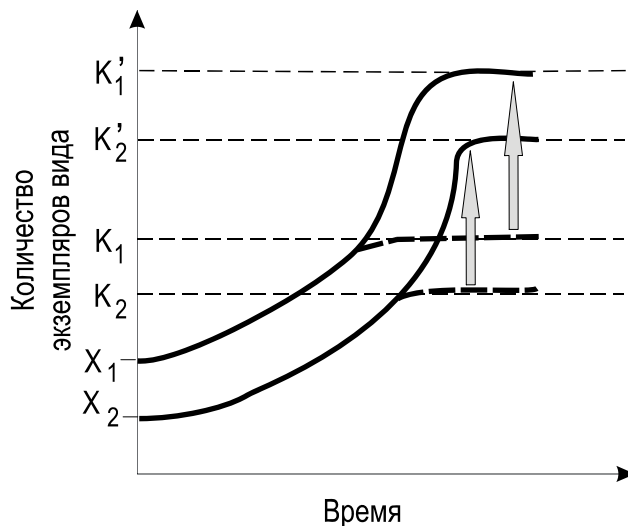


Рис. 93. Взаимодействие видов по типу мутуализма

Эти отношения широко распространены в природе, но в до-дарвиновский период на них не обращали особого внимания. Дарвин уже описывал отношения муравьев и тлей, цветковых растений и опыляющих их насекомых. Эти примеры вполне отвечают явлению мутуализма.

9.3. Модель прогноза и управления динамикой популяций

Все многообразие моделей прогнозов по шкале времени можно разделить на прогнозы *многолетние*, *сезонные* и *оперативные*. Одним из методов составления долгосрочного прогноза является метод климограмм.

Климограмма — это двумерная экологическая ниша, где учитываются температура воздуха и сумма осадков. При помощи климограммы можно установить, будет ли вредителем интродуцированный фитофаг, обитает ли объект на данной территории, прогнозировать массовое размножение какого-либо вида.

Например, размножение тлей зависит от метеорологических условий и фазы развития растения. Низкие температуры и обильные частые дожди ограничивают численность тлей, в то время как дефицит влаги и повышенная температура стимулируют их развитие и размножение. В 1988 году в Костромской области наблюдалось массовое размножение тли. Воспользовавшись этим обстоятельством, мы составили климограмму благоприятного для этого объекта года (рис. 94), что позволило прогнозировать вспышки размножения минимум за 6 месяцев. Климограмма составляется по

данным июля предшествующего года по июнь прогнозируемого. В результате установлено, что оптимальные для тли условия складываются при среднемесячной температуре воздуха $-11...+19\text{ }^{\circ}\text{C}$ и сумме осадков за месяц от 0 до 100 мм.

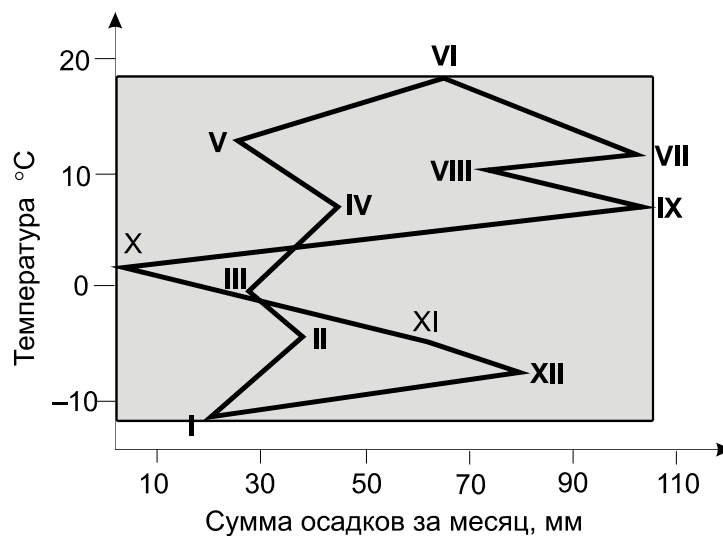


Рис. 94. Климодиаграмма оптимального года для размножения злаковой тли

Анализ многолетних климатических условий показывает, что ежегодному массовому размножению тли в Костромской области препятствуют пониженные температуры января и февраля, когда происходит гибель некоторого числа яиц.

Сезонный и оперативный прогнозы динамики составляются при помощи математических функций. Эмпирическая плотность популяций насекомых и пауков достаточно хорошо аппроксимируется логистической, гиперболической, степенной и логарифмической функциями на основе суммарной энтальпии воздуха. Для обеспечения возможности прогнозирования в элементарные функции вводится динамический коэффициент C' , являющийся разницей между эмпирической и теоретической численностью объекта на начало расчета. В общем виде функция прогноза записывается следующим образом:

$$Y = F(x) + C',$$

$$C' = C_{\phi} - F(x) \quad \text{при} \quad x_{beg} \leq x \leq x_{end},$$

где C_{ϕ} — эмпирическая численность объекта на начало расчета;
 $F(x)$ — аппроксимационная функция динамики численности популяции;

x_{beg}, x_{end} — начало и окончание интервала работы функции.

По разработанным моделям динамики популяций рассчитывается прогноз численности фитофагов и энтомофагов, а на его основе планируется целесообразность применения защитных мероприятий (рис. 95).

Сезонное прогнозирование начинается с получения от агрометеорологической станции информации о среднесуточной температуре и относительной влажности воздуха с 1 января по 10 мая. По ним рассчитывается прогноз суммарной энтальпии воздуха, который имеет два выхода: календарные сроки динамики фаз развития культурного растения (для планирования сроков выполнения технологических операций) и календарные сроки появления в консорции насекомых и пауков (для планирования сроков учета исходной численности). Когда установлена дата появления объекта, проводится эмпирический учет исходной численности, вычисляется поправочный коэффициент и рассчитывается сезонная динамика. В критическую для повреждения фазу развития растения прогнозируется соотношение энтомофагов и фитофагов и оценивается его оптимальность. Поскольку учесть все факторы динамики невозможно, устанавливается календарная дата критической фазы для проведения уточняющего эмпирического учета численности объектов, результаты которого обеспечат принятие решения о целесообразности обработки. В случае неблагоприятного соотношения необходима обработка, поэтому производится выбор средства воздействия. При этом за основу берется или вид фитофага, превышающий экономический порог вредоносности, или общий ущерб от фитофагов, рассчитанный по коэффициентам их вредоносности. На основе эффективности метода воздействия проводится повторный прогноз динамики популяций с учетом действия этого метода, вновь определяется соотношение фитофагов и энтомофагов и принимается решение о целесообразности применения выбранного метода. Если он недостаточно эффективен, расчет повторяется при выборе другого метода. После оптимального выбора принимается решение о сроках его реализации в полевых условиях.

Прогноз засоренности посевов составить несколько проще по причине ограниченной способности семян и вегетирующих растений к миграциям. Методика прогнозирования всходов сорных растений предложена Ю.П. Манько, а прогноз динамики их в период вегетации разработан нами.

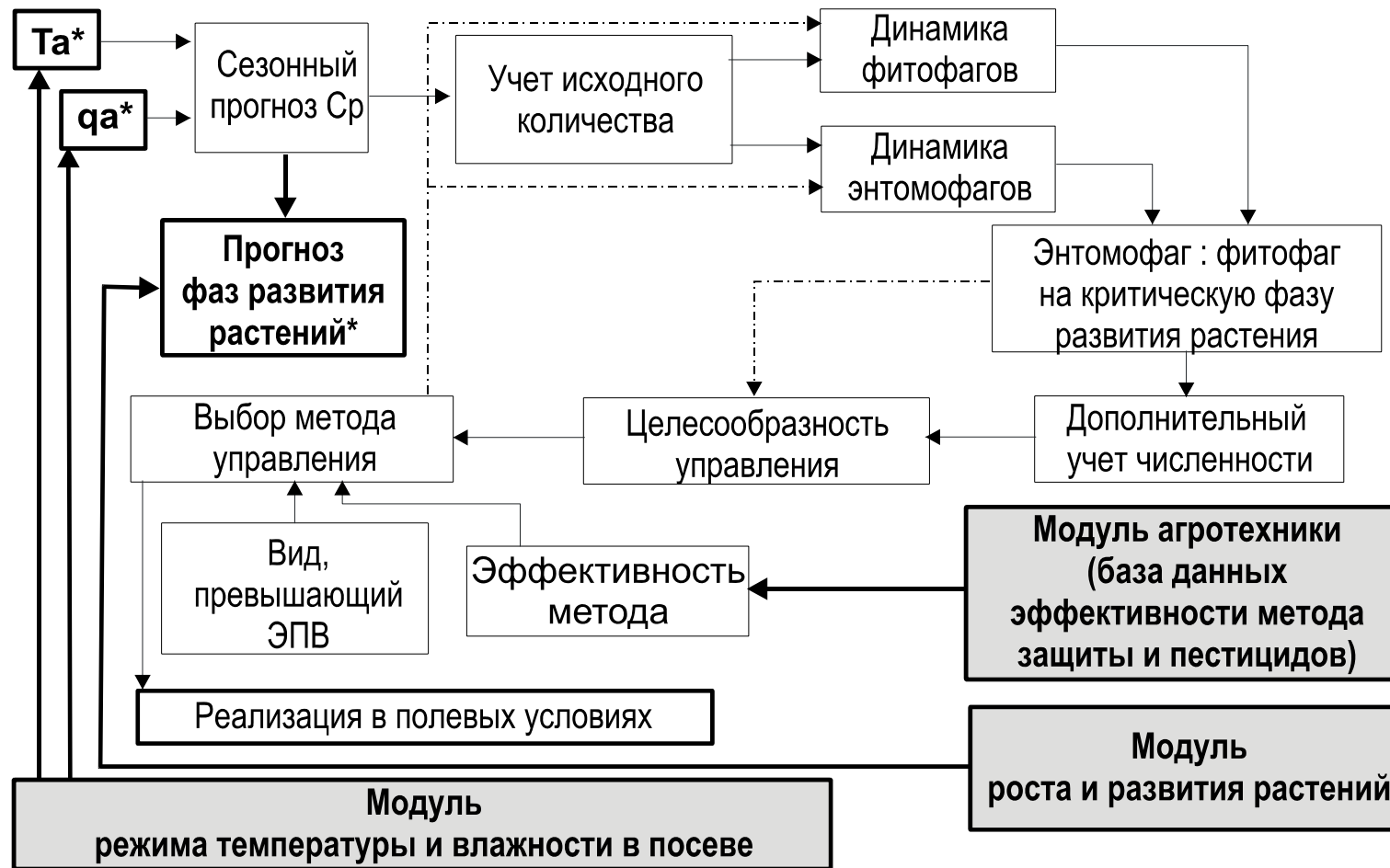


Рис. 95. Структурная схема блока управления энтомосанитарным состоянием агроэкосистемы

Количество всходов сорных растений зависит от запаса семян в почве и динамики численности сорных растений в течение вегетационного периода. Следовательно, модель прогноза засоренности должна включать несколько этапов и иметь выход на урожайность культуры (рис. 96).

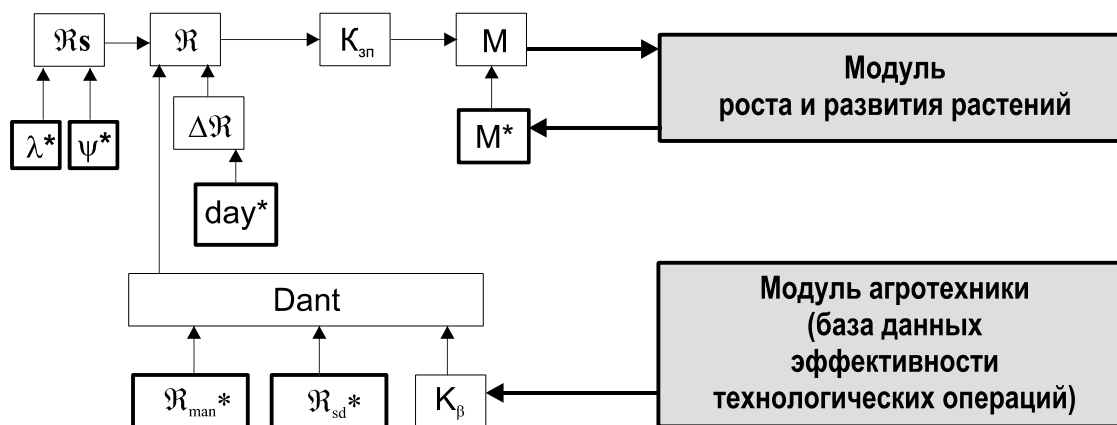


Рис. 96. Структурная схема блока прогноза засоренности посевов и корректировки урожайности модуля экологических взаимодействий:
 — внешние связи; — внутренние связи;
 * — предикторы модуля

По методике Ю.П. Манько можно делать прогноз видового состава и количества всходов сорных растений, а отсюда уже легко вычислить степень засоренности культур в отдельные периоды вегетации. Для расчета необходимо иметь данные о количестве всхожих семян в слое почвы 0...10 см. Пробы на анализ берутся поздней осенью после основной обработки почвы. Кроме того, надо иметь данные о средней многолетней полевой всхожести семян сорных растений, а также гидротермических условий прогнозируемого года. Эти данные получают по общепринятым стандартным методикам.

Количество всходов сорных растений в прогнозируемом году, \mathcal{R}_s , экз.·м⁻² вычисляется по формуле

$$\mathcal{R}_s = \sum_{i=1}^n 0,8\lambda_i\psi_j,$$

где 0,8 — средневидовой коэффициент сохранности семян в осенне-зимний период;

λ — количество семян осенью после вспашки в слое 0...10 см, млн шт.·га⁻¹;

ψ — полевая всхожесть семян, %;

j — таксономический вид сорного растения.

После появления всходов между растениями усиливается конкуренция, в результате которой происходит изреживание популяций. Результаты опытов показывают, что в период между 25- и 36-м днями от посева засоренность снижается, между 36- и 48-м — возрастает, потом тенденция к уменьшению количества сорных растений восстанавливается и изреживание популяции продолжается до конца вегетационного периода. Характерно, что на многолетних травах 1-го года жизни динамика сорной растительности аналогична однолетним культурам. Следовательно, эту тенденцию можно считать закономерной и рассчитывать по системе уравнений.

Отношение количества сорных растений на прогнозируемый день вегетации к исходному, %, вычисляется по формуле

$$\Delta \mathfrak{R} = a \cdot \ln day + b,$$

где day — день вегетации.

Переход от процентного отношения к количественному параметру засоренности осуществляется по уравнению

$$\mathfrak{R} = 0,01 \cdot \mathfrak{R}_s \cdot \Delta \mathfrak{R},$$

где \mathfrak{R} — число вегетирующих сорных растений, экз.·м⁻²;

0,01 — коэффициент пересчета процентов в доли единицы.

Поскольку степень засоренности можно регулировать агротехническими приемами, в модель вводится коэффициент антропогенного воздействия D_{ant} , который является функцией гибели особей сорных растений и зависит от вида технологической операции. По данным Ю. Росс и З. Бихеле (1969), при основной обработке почвы погибает 20% сорных растений, при предпосевной — 30%, при междурядном рыхлении — 50%, боронование до всходов с внесением гербицида — 80%. Учитывая поступление семян извне и гибель при обработках почвы, функция принимает следующий вид:

$$D_{ant} = \prod_{\beta=1}^n 0,01(100 - K_{\beta}) + \mathfrak{R}_{man} \prod_{\beta=1}^n 0,01(100 - K_{\beta}) + \mathfrak{R}_{sd} \prod_{\beta=1}^n 0,01(100 - K_{\beta}),$$

где K_{β} — гибель вегетирующих сорных растений в результате проведения технологических операций, %;

\mathfrak{R}_{man} — количество всхожих семян в дозе внесения органических удобрений, экз.·га⁻¹;

\mathfrak{R}_{sd} — количество всхожих семян сорных растений в норме высева семян основной культуры, экз.·га⁻¹.

Окончательная модель прогноза засоренности записывается как

$$\mathfrak{R} = 0,01 \mathfrak{R}_s \Delta \mathfrak{R} Dant.$$

Этот параметр рекомендуется перевести в баллы засоренности для расчета функции оптимальности засоренности посевов при корректировке уровня урожая культурного растения, которая проводится по методике, предложенной в работе А.С. Образцова [4]:

$$K_{zn} = 1 - 0,12 (\mathfrak{R} - 1),$$

где K_{zn} — степень засоренности, балл (для многолетних и однолетних трав на кормовые цели $K_{zn} = 1$).

Тогда малопараметрическая модель прогноза урожайности с учетом засоренности посевов запишется в виде

$$Y(Q, W, t, NPK, pH, Zn) = Y(Q, W, t, NPK, pH) K_{zn}.$$

Контрольные вопросы

1. От каких факторов и процессов зависит динамика популяций?
2. Влияние межвидовых взаимодействий компонентов биоценоза на динамику популяций.
3. Принципы и методика разработки модели прогноза и управления динамикой популяций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бигон, М. Экология. Особи, популяции и сообщества : в 2-х т. : Пер. с англ. / М. Бигон, Дж. Харпер, К. Таунсенд. — М. : Мир, 1989. — 667 с. : ил.
2. Бородий, С.А. Теоретическое обоснование комплексной имитационно-мониторинговой модели продукционного процесса растений в агроэкосистемах. — Кострома : КГСХА, 2000. — 202 с. : ил.
3. Каюмов, М.К. Программирование урожаев сельскохозяйственных культур. — М. : Агропромиздат, 1989.
4. Образцов, А.С. Системный метод: применение в земледелии. — М. : Агропромиздат, 1990.
5. Полуэктов, Р.А. Динамические модели агроэкосистемы. — М. : Гидрометеиздат, 1991.
6. Федоров, В.Д. Экология / В.Д. Федоров, Т.Г. Гильманов. — М. : МГУ, 1980. — 464 с. : ил.
7. Физика среды обитания растений (сокр. пер. с англ. и ред. А.М. Глобуса). — Л. : Гидрометеорологическое изд-во, 1968.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Словарь терминов

Автотрофы (продуценты) — организмы, синтезирующие необходимые им органические вещества, используя абиотические внешние источники энергии и минеральные вещества, поглощенные из окружающей среды.

Архитектоника растительного покрова — расположение фотосинтезирующих органов растения по высоте посева и их ориентация в пространстве.

Биотический потенциал — способность популяции к увеличению численности при оптимальных экологических условиях.

Биотоп — неживые компоненты экологической системы.

Биоценоз — живые компоненты экологической системы. Совокупность всех популяций биологических видов, принимающих постоянное или периодическое существенное участие в функционировании данной экосистемы.

Водный потенциал почвы (сосущая сила почвы) — сила, которая обеспечивает поглощение капельно-жидкой влаги почвенных агрегатов. Изменяется в зависимости от количества влаги в почве.

Гетеротрофы (консументы) — организмы, не способные использовать энергию абиотических источников для синтеза сложных органических соединений и пользующиеся энергией, накопленной автотрофами.

Гильдия — группа видов, использующая один и тот же класс ресурсов одинаковым способом.

Детритофаги (биоредуценты) — организмы, питающиеся отмершими остатками продуцентов и консументов.

Ёмкость среды — количественное значение фактора, лимитирующее способность популяции к увеличению численности. Проявляется при ограниченных ресурсах среды.

Климограмма — графически представленная двумерная экологическая ниша, учитывающая температуру воздуха и сумму осадков за определённый период.

Компартмент — элементарный функционирующий элемент модели, характеризующийся определенным количеством какого-либо фактора.

Консорция — совокупность видов, связанных пищевыми или прочими связями с некоторым видом, называемым эдификатором (или детерминатором) консорции, в качестве которого обычно выступает растение-автотроф.

Консументы 1-го порядка (фитофаги) — растительноядные организмы, питающиеся за счет органического вещества продуцентов.

Консументы 2-го и следующих порядков (зоофаги) — плотоядные организмы, питающиеся за счет органического вещества консументов более низкого порядка.

Коэффициент влагопроводности почвы — при полном насыщении почвы влагой он называется коэффициентом фильтрации. Характеризует скорость движения влаги в почве и измеряется в см/с. Обратно зависит от водного потенциала: с увеличением абсолютной величины последнего влагопроводность уменьшается.

Коэффициент полезного действия ФАР ($KПД_{фар}$) — часть фотосинтетически активной радиации, используемая растением для формирования биомассы.

Листовой индекс компартмента — объем листьев в единице объема компартмента ($см^3/см^3$).

Модели базовые — математическое описание теоретических представлений о механизмах, происходящих в природе процессов.

Модели вербальные — модели, описывающие какой-либо процесс словами.

Модели регрессионные — модели, отражающие результаты эксперимента в виде математических функций, обеспечивающие прогнозирование поведения системы при промежуточных градациях независимого фактора.

Модели типа «табличная и графическая информация» — модели, отражающие информацию в таблицах, графиках, диаграммах, номограммах.

Моделирование — упрощение естественной системы с целью получения модели, свойства и поведение которой оставались бы достаточно сходными с оригиналом.

Модель — это все, что похоже на данный предмет, выполняет основные его функции, но им не является.

Основная гидрофизическая характеристика почвы (кривая водоудерживания) — графическое изображение функции зависимости водного потенциала от влажности почвы.

Особь — отдельный организм данного вида.

Плодородие почвы потенциальное — плодородие почвы, проявляющееся при определенных экологических и технологических условиях на фоне средних многолетних климатических условий. Изменяется при коренных мелиорациях или других глобальных воздействиях.

Плодородие почвы природное — совокупность свойств и режимов почвы, весь комплекс экологических условий, на фоне которых развивается почва.

Плодородие почвы эффективное — часть потенциального плодородия. В хозяйственной деятельности проявляется как суммарный результат мобилизации элементов потенциального плодородия с помощью агротехнических и других приемов.

Полевые наблюдения — непосредственные наблюдения изучаемой экосистемы или определенных ее компонентов в естественных условиях при невмешательстве человека.

Популяция — совокупность особей одного вида, в течение продолжительного времени населяющих определенную территорию, связанных между собой теми или иными связями и достаточно изолированных от других таких же совокупностей.

Потенциальная урожайность — урожайность культуры, лимитирующаяся исключительно количеством поступающей на данной географической широте фотосинтетически активной радиации.

Радиация естественная — световая энергия, которую растения получают от Солнца.

Радиация фотосинтетически активная (ФАР) — часть радиации, которая обеспечивает фотосинтез.

Система — любая целостная совокупность элементов, находящихся во взаимодействии, объединенная в единое целое и способная выполнять заданную функцию.

Стация — взаимосвязь двух видов, один из которых служит пищей другому.

Теплоемкость почвы — количество тепловой энергии, которое должно быть сообщено почвенному слою для повышения его температуры на 1 °С.

Теплоемкость фенологической фазы — количество тепла, необходимое растению для перехода в следующую фазу развития.

Теплопроводность почвы — скорость передачи тепла между почвенными слоями.

Тип взаимодействия «жертва – эксплуататор» (+, –) — тип взаимодействия видов, при которых увеличение (или уменьшение) плотности популяции первого («жертвы») влечет за собой увеличение (уменьшение) скорости роста популяции второго («эксплуатора»), тогда как увеличение второго вызывает уменьшение (увеличение) скорости роста популяции первого вида.

Тип взаимодействия «аменсализм» (–, 0) — тип взаимодействия видов, когда один из видов взаимодействующей пары в биоценозе оказывает отрицательное воздействие на рост другого, хотя сам не испытывает существенного влияния с его стороны.

Тип взаимодействия «комменсализм» (+, 0) — тип взаимодействия видов, когда первый вид, называемый «хозяином», положительно воздействует на второй, называемый «комменсалом» («нахлебником»), хотя последний не влияет на «хозяина».

Тип взаимодействия «конкуренция» (интерференция) (–, –) — любое взаимно отрицательное отношение между видами.

Тип взаимодействия «мутуализм» (+, +) — взаимно положительное влияние, которое в конечном счете проявляется в том, что увеличение (снижение) численности любого из них вызывает увеличение (снижение) численности другого.

Тип взаимодействия «нейтрализм» (0, 0) — тип взаимодействия видов, если они не оказывают непосредственного воздействия друг на друга.

Экологическая ниша — область значений экологических факторов, в которой возможно длительное существование вида.

Экологическая ниша реализованная — определяется фенотипом популяции.

Экологическая ниша фундаментальная — отражает потенциальные свойства популяции, запрограммированные ее генотипом.

Экологическая система (экосистема) — многокомпонентная многоструктурная единица биосферы Земли, в которой происходит накопление и трансформация вещества и энергии.

Экологические факторы — свойства компонентов экосистемы и характеристики ее внешней среды, которые оказывают непосредственное влияние на особей данной популяции, а также на характер их отношений друг с другом и с особями других популяций.

Экологические факторы внешние (экзогенные или энтопические) — факторы, действующие на экосистему, но не испытывающие обратного влияния экосистемы.

Экологические факторы внутренние (эндогенные) — факторы, действующие на экосистему и испытывающие обратное влияние экосистемы.

Экологические факторы несущественные — факторы, не вызывающие качественное изменение экосистемы.

Экологические факторы существенные (императивные) — факторы, вызывающие качественное изменение экосистемы (вырубка леса, скашивание травостоя и др.)

Экология — наука, изучающая совокупность живых организмов, взаимодействующих друг с другом и образующих с окружающей средой обитания некое единство, в пределах которого осуществляется процесс преобразования (трансформации) энергии и органического вещества.

Экология факториальная — изучение воздействия экологических факторов на метаболизм, питание, скорость развития, плодовитость, продолжительность жизни, смертность и другие показатели жизнедеятельности особей популяции.

Экосистема (при наличии антропогенного фактора — **агро-экосистема**) — устойчивый комплекс популяций растений, животных, микроорганизмов и населяемой ими территории, включая прилегающий слой атмосферы, а также подстилающий почву грунт или грунтовые воды, если они активно взаимодействуют с почвой, водной массой или с организмами.

Экосистема замкнутая — экосистема, изолированная от возмущающего воздействия окружающей среды.

Экосистема открытая — экосистема, характеризующаяся наличием внешних (экзогенных) связей с окружающей средой.

Эксперимент — сознательное действие исследователя на факторы экосистемы, обеспечивающее определенные их изменения.

Энтальпия воздуха — количество содержащегося в воздухе тепла. Параметр окружающей среды, объединяющий среднесуточную температуру воздуха, относительную влажность воздуха и атмосферное давление.

Эффективная температура — пороговая температура, при которой прекращается рост и развитие биологических объектов.

Учебно-теоретическое издание

Бородий, С.А. Прогнозирование и мониторинг в растениеводстве : учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки 110400.62 «Агрономия» очной и заочной форм обучения. — Кострома : КГСХА, 2012. — 162 с.

ISBN 978-5-93222-237-9



Гл. редактор Н.В. Киселева
Редактор выпуска Т.В. Тарбеева
Корректор Т.В. Кулинич

Отпечатано в ГП «Областной типографии им. М. Горького»
с оригинал-макетов, изготовленных в редакционно-издательском отделе
Костромской государственной сельскохозяйственной академии