

Лекция 22. Комплексная модель продукционного процесса растений

1. Схема процессов в агроэкосистеме
2. Модель продукционного процесса, основанная на балансе воды
3. Экологические взаимодействия в агроэкосистеме
4. Модель посева сои
5. Модель агрофитоценоза пшеницы

1. Схема процессов в агроэкосистеме

Одной из наиболее продвинутых областей в математической экологии является моделирование продукционного процесса растений. Это определяется практической значимостью таких моделей для оптимизации агрокультуры и тепличного хозяйства. Здесь математические модели используются для выбора оптимальной стратегии проведения сельскохозяйственных мероприятий: полива, внесения удобрений, выбора сроков посева или посадки растений с целью получения максимального урожая. Для полностью контролируемого тепличного хозяйства возможно построение модели, описывающей весь цикл процессов при заданных условиях. Тогда с помощью модели оптимальный "рецепт" управления культурой может быть задан полностью на все время вегетации.

Если же моделируется посев в открытом грунте, на который оказывают влияние непредсказуемые погодные условия, агробиоценоз нуждается в оперативном управлении, для него используются динамические модели, допускающие оперативное изменение параметров и, возможно, структуры модели в соответствии с изменениями погодных условий.

Всю систему происходящих в агробиоценозе процессов обычно представляют в виде блочной иерархической структуры. Выделяются биотический и абиотический блоки. Среди биотических процессов выделяют в отдельные блоки рост и развитие посева, функционирование почвенной микрофлоры, развитие энтомофауны, развитие болезней сельскохозяйственных культур, взаимодействие посева с сорняками и др.

Абиотические блоки включают в себя модели, описывающие формирование теплового, водного режима почвы и приземных слоев воздуха, концентрации и передвижения биогенных и токсических солей, различных остатков распада пестицидов, ростовых веществ и метаболитов в почве, концентрации углекислого газа в посевах. Пример блок-схемы модели продуктивности агроэкосистемы приведен **на рис. 6**.

Блочная структура позволяет изучать, изменять и детализировать одни блоки, не меняя других. Как правило, число параметров внутри блоков существенно больше числа параметров, которыми блоки соединяются между собой. На основе блоков синтезируются целостные динамические модели, способные прогнозировать изменение во времени ряда характерных параметров растений, в первую очередь биомассу всего растения и

отдельных органов, начиная от всходов (иногда от момента посева) до завершения вегетации (созревания).



Рис.6. Схема взаимодействия процессов в агроэкологической системе пшеницы.

Структура и сложность модели продукционного процесса растений, степень ее детализации, форма представления процессов, происходящих в растении, определяются двумя обстоятельствами: предметом и целью моделирования. Модель роста травы, биомассу которой можно считать однородной, предназначенной для корма скота, может быть существенно проще, чем модели культур, урожай которых заключен в репродуктивных органах (злаки, бобовые) или корнеплодах. Для практических целей удобнее простая модель, позволяющая давать прогноз урожая при определенных погодных условиях или рекомендации по оптимальному режиму полива и внесения минеральных удобрений. Изучение физиологических особенностей растений и их реакций на почвенные и погодные условия требует построения сложных моделей с блочной структурой.

2. Модель продукционного процесса, основанная на балансе воды

В некоторых случаях на практике целесообразно упрощать сложную картину происходящих в агроэкологической системе процессов. При этом создают прикладные модели, которые должны быть специализированы, нацелены на решение вполне определенного круга задач. Другими словами, принцип универсальности, положенный в основу построения базовой (комплексной) модели, должен быть заменен принципом специализации. Можно иметь множество моделей, каждая из которых предназначена для решения узкого класса задач.

В связи с этим цель моделирования должна быть явно указана при построении той или иной прикладной модели. Упрощение общей ситуации

может быть выполнено двумя способами. Во-первых, в прикладные модели можно включать только часть блоков из тех, что входят в состав базовой. И, во-вторых, описание каждого блока или их части может быть заглублено. При этом важно глубоко понимать сущность моделируемых процессов и сохранить в прикладной модели основополагающие компоненты базовой.

Одной из самых простых прикладных моделей является модель продуктивности, основанная на динамике почвенной влаги. Действительно, почвенная влага (а, точнее ее недостаток или избыток) всегда лимитирует урожай. Даже в условиях орошаемого земледелия в силу ряда причин нельзя избежать условий частичного пересыхания почвы или ее переувлажнения.

Выделим расчетный слой почвы определенной глубины (например, 100 см). Условия баланса воды в этом слое за сутки можно записать в виде

$$W(k+1) = W(k) + \sum_{i=1}^I j_i(k),$$

где $W(k)$ – влагозапас расчетного слоя,

j_i – потоки воды, втекающие в расчетный слой ($j_i > 0$) и вытекающие из него ($j_i < 0$),

I – общее число потоков.

Опишем эти потоки. Суточная сумма осадков может не полностью впитаться в почву – возможный боковой сток j_1 задается коэффициентом c_1 . Поэтому

$$j_1 = (1 - c_1) \cdot Q_{pr}$$

Влагообмен на нижней границе зависит от уровня грунтовых вод. В случае их глубокого залегания избыток влаги должен удаляться из расчетного слоя, а при низкой влажности почвы возможен режим подпитки. Поэтому для потока на нижней границе расчетного слоя j_2 можно записать:

$$j_2 = c_2 (W_0 - W(k)),$$

где W_0 – константа, которая определяется как произведение наименьшей влагоемкости и толщины расчетного слоя почвы,

c_2 – представляет собой коэффициент диффузии (с размерностью сут⁻¹, должен быть достаточно малым в случае тяжелой почвы и большим – для легких супесчаных и песчаных почв).

Наконец, третий поток j_3 характеризует эвапотранспирацию (суммарное испарение, то есть количество влаги, переходящее в атмосферу в виде пара в результате поглощения корнями растений и последующей транспирации (физиологическое испарение) и физического испарения из почвы и с поверхности растительности, выражается в мм).

$$j_3 = E.$$

Таким образом, баланс влаги в расчетном слое будет складываться с учетом бокового стока, влагообмена на нижней границе и испарения.

Затем можно рассчитать величину возможного урожая культуры (Y_B) по формуле:

$$Y_B = Y_{\Pi} * K_{увл},$$

где Y_{Π} – потенциальная урожайность, рассчитанная по приходу ФАР,
 $K_{увл}$ – коэффициент увлажнения

$$K_{увл} = \frac{586 * W}{10^4 * \Sigma \text{ФАР}}$$

Где 586 – скрытая теплота испарения одного литра воды, ккал,
 W – водообеспеченность культуры за период вегетации, мм,
 $\Sigma \text{ФАР}$ – суммарный приход ФАР за период вегетации, ккал/см².

3. Экологические взаимодействия в агроэкосистеме

Все экологические взаимодействия в агроценозе можно разделить на полезные и вредные. Полезные способствуют повышению продуктивности агроэкосистем, а вредные снижают выход продукции, ради которой культивируют сельскохозяйственные растения. Первые из них протекают главным образом в почве, замыкая круговорот органического вещества и способствуя поддержанию почвенного плодородия. В почвенных процессах участвует практически вся почвенная биота, начиная от микроорганизмов и заканчивая многоклеточными животными и грызунами. Разложение отмерших растительных остатков, несимбиотическая азотфиксация, минерализация гумуса и иммобилизация важны для продуктивности агроэкосистем. В моделях они учитываются как правило, косвенным образом: от биологической активности почв зависят параметры модели, определяющие интенсивность трансформации в почве соединений азота и фосфора.

Другая группа экологических процессов – это развитие конкурентных взаимодействий культурных растений с сорняками, паразитирование на них различных видов микроорганизмов или вспышки численности вредных насекомых, приводящие к большим потерям урожая.

Взаимодействия такого рода описывает модель динамики популяции колорадского жука, развивающейся на картофельном поле. В качестве компонентов модели агроэкосистемы картофельного поля Брежнев А. И., Малинина В. Г. (1985) рекомендуют блок роста и развития картофеля; блок характеризующий динамику чистотности и возрастной структуры колорадского жука; блок энерго- и массобмена в среде описания растений; блок развития естественных врагов колорадского жука (златоглазки, периллюса); блок антропогенных воздействий (обработка почвы, опрыскивание инсектицидом). Динамика развития надземной фитомассы описывается разностными уравнениями с шагом в одни сутки. Учет повреждаемости ботвы картофельного куста произведен путем включения в уравнения баланса части надземной биомассы, изъятой для питания жуками и личинками, зависящей от численности и возрастной структуры популяции колорадского жука. Для учета зависимости вредности насекомых от стадии развития в модели учтена возрастная структура популяции. Выделены

следующие переменные модели: численность отложенных яиц x_1 , суммарная численность личинок 1 и 2 возрастов x_2 , суммарная численность личинок 3 и 4 возрастов x_3 , численность куколок x_4 и численность в трех возрастных стадиях имаго: молодых жуков летней генерации текущего года x_5 , перезимовавших жуков среднего возраста x_6 и жуков, заканчивающих свой жизненный цикл в текущем году x_7 .

Полученная система уравнений описывает экологические взаимодействия в биоценозе картофельного поля с учетом влияния на их динамику погодных условий и совокупности агротехнических мероприятий.

4. Модель посева сои

Первые блочные модели были разработаны коллективом американских авторов (SPAM - Soil-Plant-Atmosphere Model, Schawerofft et.al., 1974) и де Витом и его группой (BESCROP - Basic Crop Simulation, De Wit, 1978). В настоящее время имеется несколько десятков такого типа моделей формирования урожая, разработанных с разной степенью детализации для сои, пшеницы, трав, кукурузы, хлопчатника и других культур. На рис. 7 представлена блок-схема модели посева сои, которая представляет имитационное описание роста, развития и урожайности сои и считается одной из первых подробных моделей роста сельскохозяйственных культур (из монографии Дж. Франса и Дж. Торнли «Математические модели в сельском хозяйстве» (1987)).

В ней объединены несколько субмоделей и большое количество входных данных (данные о растениях, особенностях посева, климатические данные и почвенные характеристики). В модели SOYMOD учтены параметры сухого вещества: структурные углеводы, доступные углеводы (неустойчивые соединения, которые могут передвигаться по растению), крахмал и белок. Эти вещества распределяются между различными морфологическими частями: пластинками и черешками листьев, плодами и корнями. Предполагается, что необходимые для процессов роста и жизнедеятельности растения материалы - это азот и углерод. Они перемещаются между морфологическими частями растения и реализуются в этих частях для роста, дыхания, образования новых органов, транспортных процессов. Соотношение между углеродом и азотом используют в качестве функций контроля за ростом различных частей растения. В этом смысле модель сои относится к моделям углеродно-азотного типа.

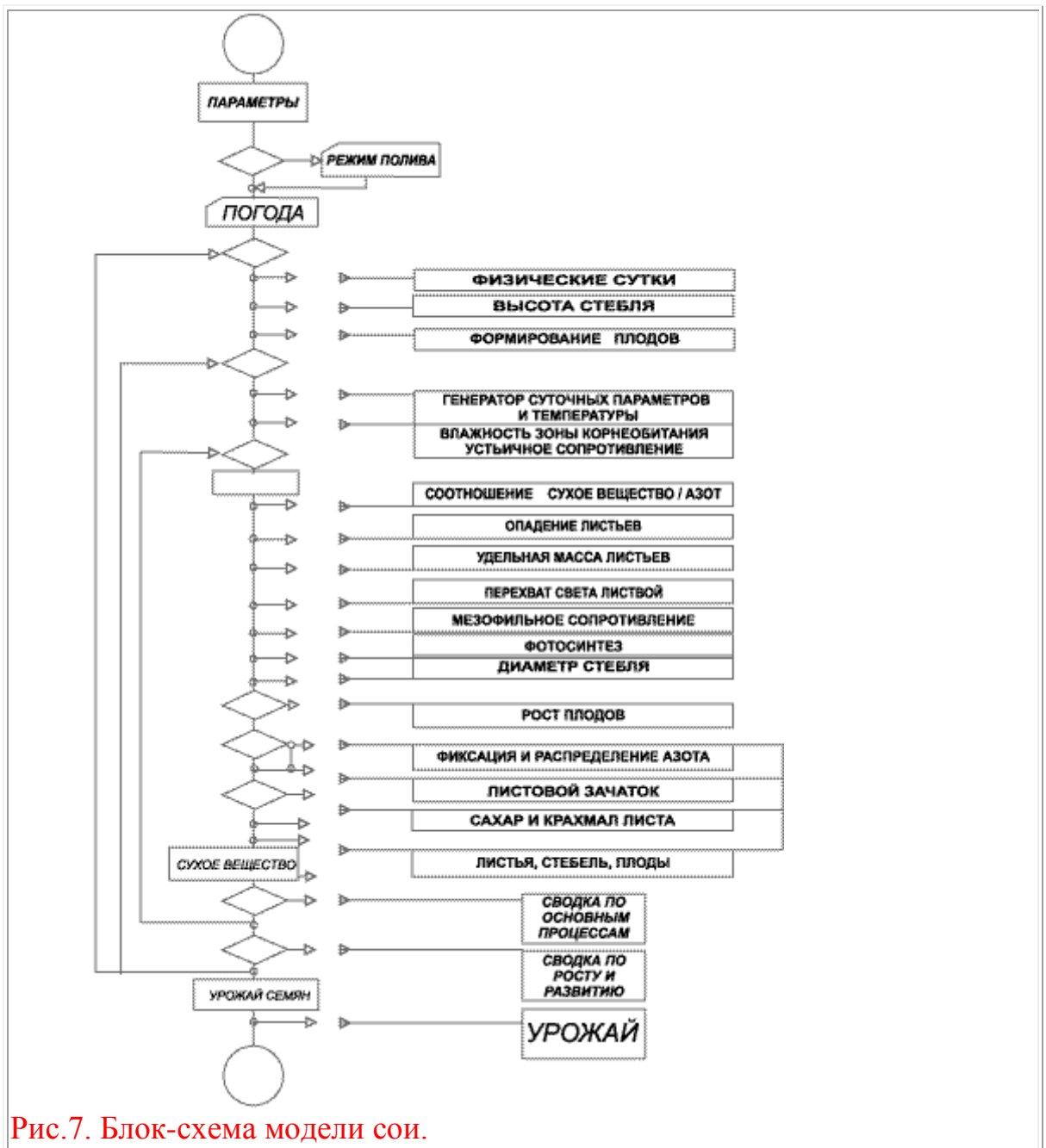


Рис.7. Блок-схема модели сои.

5. Модель агрофитоценоза пшеницы

Модель агрофитоценоза пшеницы (система Симона) – одна из детальных имитационных моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений, разработана под руководством Р.А. Полуэктова в Петербургском агрофизическом институте. С математической точки зрения модель представляет собой систему из нескольких уравнений в частных производных параболического типа и нескольких десятков обыкновенных дифференциальных уравнений. При переходе к численной схеме выбирают шаг интегрирования по координате x и по времени t . Базовый временной шаг модели выбран равным одному часу, это позволяет имитировать суточный ход как абиотических (энергообмен), так и биотических (фотосинтез, метаболизм) процессов. Состояние абиотической

части системы характеризуется набором вертикально распределенных переменных: радиации, температуры и влажности воздуха в посевах, температуры и влажности почвы и др. Биологическая часть системы представлена переменными: плотность ассимилирующей поверхности фитоэлементов, поглощающей поверхности корней, плотность отдельных составляющих биомассы (углеводы, аминокислоты, белки) и фитомассы в целом и др.

В модель включено описание процессов трех типов:

1) энерго- и массообмен, происходящий в среде обитания растений (в почве и приземном воздухе) и в самих растениях;

2) совокупность биофизических и физиологических процессов в растительном покрове, определяющих прирост биомассы, рост и развитие отдельных органов растения и формирования урожая;

3) экологическое взаимодействие культурных растений с сорняками, болезнетворными микроорганизмами и вредителями.

В качестве входных переменных выступают контролируемые (агротехника) и неконтролируемые (погода) внешние воздействия. Динамика погодных условий представлена реализациями многомерного случайного процесса. Отдельные блоки модели подробно описаны в монографиях: (Бондаренко и др., 1982; Заславский, Полуэктов, 1988). Каждый из блоков представляет собой описание группы однородных физических, биофизических, биохимических или физиологических процессов в отдельных частях системы почва-растение-атмосфера. Каждый из блоков решает свою математическую задачу, и может быть верифицирован (т.е. проведена проверка правильности его работы) на независимых массивах экспериментальных данных. Объединение блоков в целостную систему и возможная последующая редукция (упрощение) этой системы представляет собой также самостоятельную задачу из области теории сложных систем.

Модели типа SOYMOD или СИМОНА слишком сложны для использования в практике. В своем полном объеме такие модели, действительно, служат исследовательским целям, причем они непрерывно развиваются, их структура и значения параметров уточняются с использованием новейших данных о характеристиках моделируемой системы. Их тщательный анализ открывает путь и для практических применений. Потребитель может вести диалог для решения конкретных практических вопросов сельскохозяйственного производства. Например, запрашивать возможные пределы изменения урожая для конкретного поля, задавая величину и сроки выпадения осадков или решать оптимизационные задачи о сроках и дозах внесения удобрений.

Из приведенных примеров ясна степень сложности имитационных моделей для изучения живых систем. В работу по составлению, проверке и использованию одной такой модели вовлечены многие специалисты разных областей: агробиологи, почвоведы, метеорологи, биохимики, экологи, энтомологи и т.д. Математики и программисты, по существу, занимаются обобщением и анализом их рекомендаций. Но они, обычно, не в состоянии

понять даже специальную терминологию отдельных областей. Поэтому биологи, специалисты сельского хозяйства, рассчитывающие извлечь пользу из современных методов моделирования, должны быть подготовлены к сотрудничеству с математиками. В частности, понимать принципы и проблемы моделирования.

Литература:

1. Брежнев, А. И. Математическое моделирование экологических взаимодействий в агроэкосистеме картофель – вредитель – среда обитания. / А. И. Брежнев, В. Г. Малинина. – В кн. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 262 с.
2. Полуэктов, Р. А. Динамические модели экологических систем / Р. А. Полуэктов, Ю. А. Пых, И. А. Швытов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 288 с.
3. Полуэктов, Р.А. Динамические модели агроэкосистемы: монография/ Р. А. Полуэктов. Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 311с.
4. Смиряев, А.В. Моделирование: от биологии до экономики: учеб. пособие для студентов специальности «селекция и генетика сельскохозяйственных культур»/ А.В. Смиряев, А.В. Исачкин, Л.К. Харрасова. М.: Изд-во. МСХА, 2002. – 122 с.
5. Франс, Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж.Франс, Дж.Торнли. М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.