

## Лекция 9

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

План:

1. Теоретические и практические основы моделирования в агрофитоценозах
2. Классификация моделей и их характеристика
3. Математические модели, их характеристика
4. Основные элементы и этапы математической модели
5. Компьютерные программы в моделировании
6. Экспериментальные и виртуальные модели для интегрированной защиты растений

#### Вопрос 1: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В АГРОФИТОЦЕНОЗАХ

Исследования объектов или процессов на их моделях необходимы в тех случаях, когда они достаточно сложны и недоступны для прямого наблюдения или ограничено экспериментирование на них, недостаточны или отсутствуют требующиеся знания, например, для оценки будущего поведения сложных систем.

Моделирование — специфический и важнейший научный метод познания, основанный на определенной аналогии между объектами, процессами или в целом системами, являющимися оригиналами, и их моделями (аналогами).

**Система** — это относительно обособленная и упорядоченная совокупность обладающих особой связностью и целесообразно взаимодействующих элементов, способных реализовать определенные функции. Чрезвычайно важно выявить связи между компонентами системы, с тем, чтобы понять, как она функционирует. Общая структура системы в биологии и экологии понимается как иерархия подсистем, позволяющая идентифицировать уровни организации системы в целом. Каждая подсистема и ее компоненты относительно независимы и вносят определенный вклад в поведение системы в целом, улучшают ее управление. Существующее между системой и окружающей средой взаимодействие позволяет наблюдать и учитывать поведение системы.

**Аналогия** — это подобие, сходство предметов или процессов, проявляющееся во внешних формах, в структуре, действиях, последствиях и т.п.

**Модель** является воспроизведением изучаемого реального объекта или процесса (оригинала) в качестве его заменителя. Это обобщенное определение модели. В биологии термин «модель» включает различные значения;

количество моделей столь же велико, как и степень их сложности и пригодности. Модель может быть даже устным высказыванием (потенциал инокулюма Гаррета), эвристической формулой, более или менее сложным математическим уравнением (для описания прогноза вредителей или имитации эпифитотии), представлять собой набор биологических параметров программы для ЭВМ. Одной из самых первых математических моделей, известных в биологии, является модель расщепления в генетике. Она представляет собой вероятностную модель, имеющую большое значение при изучении популяций и эволюционных изменений.

Модель служит средством познания оригинала, это абстракция реального мира, упрощенное приближение к действительности (к ее частям), но ни сама действительность, ни ее копии. Это предполагает, что модель редко бывает полной, окончательной и объективной. Между оригиналом и моделью всегда имеются различия, поэтому выводы в умозаключениях по аналогии носят вероятностный характер и требуют дальнейшего уточнения, корректировки и проверки на практике. Каждая модель базируется на предшествующем опыте или экспериментах и должна снова проверяться и совершенствоваться путем экспериментирования. Однако качество экспериментальной проверки может быть снижено из-за пределов экспериментальной точности или из-за отсутствия доступной и достоверной методики или оборудования.

Модели служат в качестве дедуктивных или индуктивных идей, содействующих научному прогрессу с помощью экспериментов.

## **Вопрос 2: КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА**

В зависимости от способа отображения свойств исследуемой системы через те или иные носители модели подразделяются на две группы: физические (материальные) и абстрактные (концептуальные).

Физические модели (субстратные, предметные и аналоговые) строятся на принципах прямой аналогии, т.е. моделями являются материальные тела.

Субстратные модели изготавливают из материала (субстрата) идентичного материалу объекта. Они используются в основном для демонстрационных целей, например модели различных конструкций теплиц, агрегатов.

Предметные модели — это объемные модели, которые воспроизводят пространственные формы реального объекта. Распространенными примерами предметных моделей являются модели вирусной частицы (ВТМ) и дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Они отличаются от оригинала размерами и строительными материалами.

Следует отличать модели от аналогов. Аналог — это любое устройство или объект, в котором элементы связаны между собой. Так, камера искусственного климата или фитотрон является аналогом естественной среды, в которой протекает болезнь растений. Споролувушка может рассматриваться как аналог поверхности растения-хозяина. Соответствующим образом

запрограммированная ЭВМ также должна рассматриваться как аналог болезни. Аналоги могут служить для создания моделей и рассматриваться как инструментальные модели.

Аналоговые модели — это физические системы, предназначенные для изучения различных процессов, протекающих в объекте. Они основаны на том, что имеют функциональное сходство в модели и оригинале и возможно одинаковое математическое описание процессов. Аналоговое моделирование осуществляется обычно на вычислительных машинах.

Абстрактная модель описывает объект с помощью абстрактнологических средств (знаки, числа, графики и др.). При этом факторы, воздействующие на нее, и ее реакции на эти воздействия в виде результативных выходных величин рассматриваются как переменные, а закономерности поведения системы описываются соответствующими уравнениями и неравенствами. Хотя все модели имеют логический статус, они могут носить пробный или предварительный характер. Моделями могут быть рабочая гипотеза, реальная гипотеза, теория или закон. Хотя закон и является моделью, не каждая модель является законом.

Экономико-математическая модель представляет собой концентрированное выражение наиболее существенных взаимосвязей и закономерностей поведения экономической системы в математической форме. Она позволяет воспроизводить разнообразные производственные ситуации, в том числе включающие использование приемов защиты растений от сорняков, вредителей и болезней; при этом можно исследовать большое количество их вариантов и выбрать из них лучший.

### **Вопрос 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА**

Формализованное представление закономерностей поведения реальных систем в виде абстрактных математических аналогов (системы уравнений и неравенств) получило название математического моделирования.

Математическую модель с конкретными числовыми характеристиками называют числовой. Многие модели строятся на основе статистических совокупностей и теории вероятностей.

Применение математического моделирования и ЭВМ для изучения различных систем (анализа, прогнозирования, планирования, управления) позволяет воспроизводить разнообразные ситуации, исследовать большее число вариантов развития системы и выбрать наилучший с точки зрения поставленной цели. Методы многомерного статистического анализа являются основным приемом количественного описания сложных взаимодействий популяций вредителей, возбудителей болезней и растений-хозяев в изменяющихся условиях окружающей среды. Построение надежных регрессионных моделей позволило непосредственно подойти к обобщению большого разнообразия данных и осуществлять прогнозирование и управление численностью популяций вредных организмов.

Создание и изучение математических моделей конкретных комплексных явлений с помощью ЭВМ называют имитационным моделированием в отличие от других математических методов анализа явлений и процессов общего вида. Имитационные модели позволяют воспроизводить на ЭВМ ход биометеорологических процессов и оценивать реально наблюдаемые величины. Такой подход оказался особенно плодотворным при имитации явлений, искусственное воссоздание которых в полевых условиях слишком дорого или рискованно.

**Эпифитотия** — типичный представитель такого класса явлений. Количественный анализ событий эпифитотического цикла прошел к настоящему времени все вышеупомянутые этапы формирования целостного подхода от использования простейших статистических методов до имитации на ЭВМ. Некоторые математические модели не приводят к установлению определенного числа, а устанавливают отношения между величинами. Логика также играет важную роль в математическом моделировании, особенно в имитационном. Если результаты моделирования однозначно определяются множеством независимых переменных, модель является детерминистической. А если исходная для модели информация и результаты моделирования носят вероятностный характер, модель называют стохастической.

По характеру описания явлений во времени модели бывают статические и динамические.

Все математические модели в биологии должны удовлетворять следующим предварительным условиям.

1. Разумная простота и логическая непротиворечивость.
2. Естественность, с которой математика отображает реальность.

Модель должна быть отвергнута, если ее сущность не подкрепляется на протяжении наблюдаемых или измеряемых событий. Некоторые отклонения допустимы, если они возникают из-за чрезмерного упрощения или в результате воздействий, не учтенных моделью.

3. Математическая корректность (с некоторыми исключениями, если выполняется п. 4).

4. Способность вырабатывать прогнозы.
5. Совместимость с естественными науками.

6. Модель должна быть применима к какому-либо классу явлений.

#### **Вопрос 4. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЭТАПЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Моделирование является научным методом исследования различных систем, рассматриваемых как оригиналы, на их формализованных аналогах — математических моделях. Основными этапами математического моделирования являются:

1. Постановка задачи: определение цели ее решения; качественное описание объекта моделирования; выяснение известных параметров объекта и тех, которые надо определить.

2. Выбор математического метода решения задачи и программ для ЭВМ.
3. Определение перечня переменных величин и ограничений.
4. Построение математической модели задачи (подбор оптимальной формулы).
5. Подготовка информации: получение учетных, отчетных, статистических, нормативных, справочных и других данных; их предварительная обработка.
6. Построение числовой экономико-математической модели.
7. Перенесение информации на машинные носители. Решение задачи на ЭВМ.
8. Анализ результатов решения, при необходимости — корректировка модели, повторное решение задачи на ЭВМ по скорректированной модели.
9. Анализ различных вариантов, выбор проектного решения и оформление полученных результатов.

В зависимости от характера поставленной задачи количество и последовательность этапов могут изменяться.

Модель представляет систему уравнений и неравенств, служащих ограничениями, а также целевую функцию. Для ее разработки необходимо, чтобы связи и зависимости моделируемого процесса носили линейный характер; система линейных уравнений и неравенств имела множество решений; переменные модели были неотрицательными; линейный критерий позволил бы выбрать из множества решений наилучший вариант.

Модель включает переменные, ограничения, коэффициенты переменных и ограничений модели и целевой функции, константные показатели ограничений.

Перечень переменных величин должен отражать основное содержание процесса. В моделях различают основные переменные и вспомогательные, для каждой переменной устанавливается единица измерения. После определения переменных в модели устанавливаются основные, дополнительные и вспомогательные ограничения, которые могут накладываться на отдельные переменные, их часть или на все. В систему ограничений могут входить три типа линейных соотношений: равно ( $=$ ), меньше или равно ( $<$ ), больше или равно ( $>$ ).

## **Вопрос 5. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ**

В отечественном сельскохозяйственном производстве для решения многих экономических задач с помощью математического моделирования часто используется компьютерная программа SIMPLEX.

Компьютерные программы позволяют получить новое качество для принятия экономически и экологически обоснованных решений о применении прямых мер борьбы с сорняками, вредителями и болезнями в посевах или посадках культурных растений. Число таких программ и моделей,

разработанных научными учреждениями и предлагаемых службе защиты и хозяйствам, постоянно растет, особенно за рубежом.

В частности, в Германии в защите растений для борьбы с сорной растительностью в посевах культурных растений на практике уже широко применяют компьютерные программы. Они позволяют принимать оптимальные конкретные решения о необходимости применения гербицидов на определенном поле в хозяйстве. Такие программы перерабатывают много информации, влияющей на принятие решений, но в их основе всегда находятся пороги вредоносности или борьбы.

Для более точных решений по борьбе с вредителями и болезнями имеется большой спектр систем компьютерных программ, которые являются моделями прогноза. Они дают пользователям сигнал об опасности поражения сельскохозяйственных культур в конкретных условиях. Отчасти они представляют собой вспомогательные системы для принятия решений о необходимости проведения и сроках обработки пестицидами непосредственно для отдельного поля. Для этого пользователь программы (фермер) должен иметь соответствующие специальные знания для проведения фитосанитарного мониторинга своих посевов.

Не все программы оказываются достаточно точными для использования на практике. Многие из них требуют еще дальнейшей верификации. Однако компьютерные программы для многих культур уже сегодня являются основой консультационных услуг химических

## **Вопрос 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ВИРТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ**

Проблема защиты сельскохозяйственных культур от сорняков, болезней и вредителей потребовала разработки биологически обоснованных и экономически рациональных схем мероприятий по уменьшению потерь урожая. При этом необходимо рассматривать совместно динамику популяций культурных растений, а также популяции сорных растений, вредителей и возбудителей болезней с учетом почвенных и метеорологических условий. Таким образом, в исследования оказывается вовлеченным большое число факторов, находящихся в разнообразных количественных соотношениях.

Следует учитывать, что исследования, проводимые в условиях лабораторий или в теплицах, в массе своей воспроизводят лишь ограниченное количество простейших событий из огромнейшего их числа, происходящих в поле. Поэтому возникла необходимость в способе воссоздания реальных процессов в реальных масштабах без катастрофических последствий для хозяйственной деятельности. Вмешательство человека (использование устойчивых сортов, пестицидов, агротехнические приемы и т.п.) в сложные взаимоотношения между популяциями организмов агробиоценозов должно не только преследовать ближайшие практические цели (например, сохранение урожая в текущем году), но и соответствовать глобальной стратегии —

гармоническому сочетанию интересов человека и природы. Все эти составляющие условия интегрированной защиты растений предопределили широкое использование моделирования для прогнозов и управления фитосанитарным состоянием агробиоценозов.

#### *Основы моделирования эпифитотий*

Эпифитотия как массовое заболевание растений может рассматриваться как развитие болезни во времени и в пространстве. Болезни и их эпифитотии представляют собой системы, взаимосвязанные комплексы процессов, характеризующиеся многими взаимными причинно-следственными связями. Сложную систему, подобную эпифитотии, можно изучать путем моделирования ее элементов в виде подсистем, представляющих основные компоненты с более или менее общими свойствами. Ее можно дополнить более специфическими компонентами, пока не останутся компоненты, уникальные для какой-либо одной эпифитотии. Это позволяет моделировать самые разнообразные эпифитотии. С другой стороны, одну и ту же эпифитотию можно описать с помощью разных моделей.

Математическое моделирование эпифитотий рассматривается в работах Ван дер Планка и других авторов. Насколько быстро развивается эпифитотия, зависит от скорости нарастания инфекции. Под скоростью нарастания инфекции понимают скорость, с которой инокулом с пораженного растения осуществляет заражение других растений. Она зависит от трех основных переменных: исходного инокулома, скорости инфекции и времени. Выделяют два основных типа динамики эпифитотического процесса болезней: распространение по типу «сложных процентов» и распространение по типу «простых процентов».

Болезни типа бурой ржавчины пшеницы ( $r$ -стратегии) распространяются по типу «сложных процентов», передача возбудителей носит цепной характер, образуется много поколений возбудителя, инкубационный период короткий. Кривые сезонной динамики проявления эпифитотического процесса имеют эксплозивный (взрывной) вид с крутым подъемом и резко выраженным кульминационным пунктом и спадом.

Математически степень развития такой болезни в зависимости от времени можно записать как  $\log X/ - X$ , где  $X$  — доля зараженной ткани зараженных растений, или процент пораженных растений.

Болезни типа корневых гнилей ( $K$  — стратегии) распространяются по правилу «простых процентов». Передача возбудителей при этом носит массовый одномоментный или веерообразный характер. Одновременно заражается большая часть популяции растений. Эпифитотический процесс носит тардивный (медленно нарастающий) характер. Кривые сезонной динамики эпифитотического процесса напоминают кривую нормального распределения без резко выраженного кульминационного пункта. Математически степень развития этой болезни в зависимости от времени также можно записать как  $\log X/ - X$ , но с учетом того, что в ходе распространения болезни число растений, доступных для заражения, уменьшается.

Простейшей моделью изменения популяций во времени для болезней, передающихся с воздушными потоками (анемохорный способ), является

где  $D$  — скорость нарастания болезни за жизненный цикл (генерацию);  $A$  — первичный запас инфекции или начальная пораженность;  $c$  — число спор, образующихся в очаге поражения;  $P$  — вероятность заражения (0 — ни одна из спор не вызывает заражения, 1 — все споры вызывают заражение);  $T$  — время;  $t$  — инкубационный период.

Эту модель изменения популяций во времени можно использовать для анализа параметров популяций, оценки развития и прогнозирования.

При изучении эпифитотического процесса приходится иметь дело по меньшей мере с двумя популяциями: растений-хозяев и возбудителя болезни, в результате взаимодействия которых и возникает эпифитотия. Эпифитотии инфекционных болезней растений неизменно зависят от регулярной цепи событий. Эти события с точки зрения системного анализа представляют собой элементы, а их отношения — структуры (Эпифитотии болезней растений, 1979). Влияние времени и пространства является неотъемлемой особенностью эпифитотии. Кроме того, они характеризуются популяционными явлениями со случайными процессами, флуктуациями, периодичностью, а также порогами, пределами и дискретностью. Вследствие этих сложностей необходимо определять и анализировать большое число случаев уместных сочетаний в цепи: болезнь — растения-хозяева — окружающая среда — меры борьбы. Все это неизменно порождает массу противоречивых данных, а также ведет к многомерной ситуации с несколькими независимыми переменными и одной или более зависимыми переменными, такими как кривые развития болезни. Эти кривые характеризуют эпифитотию и суммируют влияния. Для анализа данных в эпифитотиологии недостаточны регрессионный, корреляционный и ковариационный анализы, как одно- так и многомерные. Эти явления хорошо подходят для описания математическими методами и посредством программ ЭВМ.

Конечной целью всех эпифитотиологических исследований должна являться автоматизированная система управления защитой сельскохозяйственных культур от болезней на базе универсальных математических моделей, отражающих фундаментальные принципы взаимодействия популяций в реальных почвенных и климатических условиях. Скорость ее развития, интенсивность поражения посевов и посадок определяются многими причинами: генетическими свойствами вирулентности и агрессивности фитопатогена и восприимчивостью растения-хозяина; разнообразными факторами внешней среды, особенно метеорологическими.

Попытки связать прохождение некоторых решающих этапов инфекционного цикла, уровень развития болезни с тем или иным фактором или их совокупностью и использовать данные для составления прогнозов болезни предпринимаются давно. На основе таких закономерностей предложены номограммы для определения инкубационного периода фитофтороза картофеля, желтой и бурой ржавчины пшеницы; график кривой

инкубационного периода для миль- дью (ложной мучнистой росы) винограда. Они успешно используются для краткосрочного прогноза этих заболеваний (Защита растений от болезней, 2003; Поляков и др., 1995).

В основе создания моделей эпифитотий должны лежать достоверные и доступные методики фитопатологических экспериментов, таких как измерения и прогнозирование изменений количества спор грибов, степени поражения в системе патогенрастение во времени и в пространстве на фоне меняющейся погоды. Необходимо при этом использовать оптимальный объем выборки. Следует учитывать, что излишне большая детализация сведений о ходе эпифитотического процесса не оправдана из-за ограниченности возможности их анализа.

Многими учеными в России и за рубежом проводились конкретные исследования по созданию математических моделей эпифитотий для оптимизации мероприятий по защите урожая от болезней.

*Моделирование и теоретические основы динамики численности насекомых*

Основные биологические параметры, задающие рост численности, выражены в элементарной абстрактной модели неограниченного роста численности, где исходная популяция данного вида находится в условиях абсолютно неограниченных (бесконечных) жизненных ресурсов (Варли, 1978). В этой ситуации происходит бесконечный рост численности в геометрической прогрессии, по параболической кривой, описываемой функцией

где  $N_t$  — численность в данное время;  $N_0$  — исходная численность;  $t$  — время.

Главным специфическим показателем этой модели является  $r$  — коэффициент скорости роста численности или биотический потенциал размножения, определяющий угол наклона кривой. В данной модели  $r$  предполагается константой, определяемой биологическими свойствами данного вида:

где  $b$  — рождаемость;  $d$  — смертность;  $m$  — поправка на миграции.

В модели неограниченного роста численности смертность нивелируется и ограничивается средними сроками биологического старения организмов, миграциями пренебрегают. Таким образом, уровень и темпы роста численности задает рождаемость. В свою очередь, рождаемость линейно зависит от плодовитости особей и экспоненциально (в степени) — от скорости развития, например от количества поколений, развивающихся за год. Именно эти биологические параметры прежде всего определяют уровень динамики численности.

В несколько более реалистичной модели ограниченного роста численности популяция находится в условиях ограниченных (конечных) жизненных ресурсов, которые могут воспроизводиться, но только до определенного предела. Соответственно в модель вводится предельный уровень численности  $K$ , называемый также емкостью среды и означающий

максимальную численность особей, которую популяция данного вида может достичь в данных условиях. При этом характер роста численности принципиально меняется. Первоначально численность растет по параболической кривой, лишь немного отставая от кривой неограниченного роста. По мере приближения к пределу рост численности замедляется, кривая дает перегиб и далее гиперболически стремится к уровню  $K$ . В итоге образуется логистическая или S-образная кривая, характерная для данной модели. Здесь заметен регулирующий эффект плотности (т.е. относительной численности популяции) на рост численности.

Данные динамики популяций выражают кривыми динамики популяций, кривыми поколений, гистограммами, линейными и логарифмическими шкалами, в виде решений ЭВМ.

Погода и климат влияют на физиологию и поведение насекомых, они могут определять изменения популяций (Танский, 1988). Поэтому изменения показаний температуры, влажности, ветра, осадков обязательно учитывают при составлении прогнозов вредных насекомых и составлении моделей их динамики и вредоносности. Выявляют корреляции между численностью популяции конкретного вида насекомого и метеорологическими данными. Более сложные модели учитывают также взаимодействие вредителей с популяциями хищников и паразитов. В моделях популяций насекомых широко используют таблицы выживания, в которых различные факторы смертности постепенно действуют на последовательные стадии развития.

Подобные таблицы выживания учитывают в моделях применения инсектицидов, причем они позволяют учесть побочное действие препаратов, способных уничтожить эффективного естественного врага насекомого-вредителя и предотвратить неожиданную вспышку размножения вредителя. Взаимодействие различных факторов смертности друг с другом слишком сложно, чтобы результат можно было предугадать, не пользуясь математической моделью. Меняя должным образом параметры модели и субмоделей, можно математически проверить последствия введения дополнительных факторов смертности для вредного вида, для его паразитов и хищников и избежать таких мер, которые не обеспечат эффективной защиты от вредителя.

В защите сельскохозяйственных культур и лесных пород в России, и особенно за рубежом, широко используются модели-прогнозы динамики популяций многих вредных насекомых (колорадский картофельный жук, злаковые тли, трипсы, зимняя пяденица) и выбора мер борьбы с ними в конкретных условиях (Защита растений в устойчивых системах земледелия, 2003). Кроме того, моделирование позволяет оптимизировать системы защиты конкретных культур от наиболее вредоносных насекомых-вредителей и выбрать наилучшие варианты для конкретного хозяйства и даже участка (Поляков, 1995).

*Моделирование обилия сорняков и их вредоносности*

Математическая интерпретация зависимости «сорняки — урожай» для отдельных культур осуществлена рядом ученых с использованием различных видов уравнений.

Обобщив многочисленные экспериментальные материалы, А.М. Туликов (Земледелие, 2008) установил, что количественная зависимость между обилием всего сообщества сорняков и урожайностью любой культуры при 95%-ном уровне вероятности описывается экспоненциальным уравнением регрессии общего вида:

где  $U$  — урожайность основной культуры на засоренном участке, г/м<sup>2</sup>, т/га, %;  $a$  — потери урожая при максимальном засорении посевов;  $e$  — основание натуральных логарифмов ( $e = 2,7183$ );  $b$  — интенсивность снижения урожайности культуры от сорняков;  $x$  — обилие сорняков, шт/м<sup>2</sup>, %;  $c$  — урожай при максимальном засорении посевов.

Чтобы воспользоваться этим уравнением для определения фактической или прогнозируемой урожайности в зависимости от фактического или возможного обилия сорняков в посевах, необходимо иметь значения параметров  $a$ ,  $b$  и  $c$  для каждой конкретной культуры. Если в уравнение подставить абсолютные значения этих параметров и значения фактической или возможной численности сорняков, выраженной в процентах (за 100% принимаем 1000 сорняков на 1 м<sup>2</sup>), то получим урожайность культур, выраженную в процентах (за 100% принимаем значение урожайности в т/га в посевах, совершенно свободных от сорняков).

Для упрощения всех расчетов величины урожайности ряда культур (в %) в зависимости от обилия сорняков представлены в табл. 8.

Таблица 8 Прогноз урожайности культур по функции  $U = ae^{bx} + c$  в зависимости от численности сорняков (% от урожая без сорняков)

Культура	Число сорняков на 1 м <sup>2</sup>						
	5	10	25	50	100	200	500
Озимая пшеница	98,1	96,4	91,4	84,2	72,9	59,0	46,5
Яровая пшеница	98,2	96,6	91,7	84,3	72,4	56,1	37,5
Ячмень	98,5	96,9	92,6	86,5	76,8	65,1	54,6
Гречиха	97,0	94,2	86,8	77,2	65,6	56,7	53,6
Лен-долгунец	99,1	98,2	95,7	91,5	84,0	71,3	47,2
Кукуруза на силос	97,1	94,3	86,4	74,8	56,9	34,7	14,8
Картофель	97,6	95,3	89,1	80,6	68,8	57,0	50,9

Сахарная свекла	97,0	94,1	86,0	74,2	55,9	33,8	14,2
Подсолнечник	97,4	94,9	88,2	78,6	64,9	50,3	40,8
Однолетние травы	98,0	96,0	90,3	81,7	67,4	47,4	23,1
Многолетние травы	97,0	94,3	87,9	80,9	74,6	71,8	71,4

С помощью этой таблицы можно оперативно решать многие практические вопросы. Например, если в посевах кукурузы на силос применение гербицидов позволило снизить число сорняков со 100 до 10 на 1 м<sup>2</sup>, то это обеспечило прибавку урожая зеленой массы в 37,4 %. А при урожайности на обработанном гербицидом участке зеленой массы кукурузы 55,0 т/га (94,3%) фактическая прибавка составила 21,8 т/га (37,4 %).

Аналогично можно решить и многие другие как частные тактические вопросы (установить прибавку урожая культуры при полном уничтожении сорняков; определить возможные потери урожая, если засоренность будет снижена только на 50 %), так и стратегические (определить конкурентоспособность культур по отношению к сорнякам; при конкретном уровне засоренности установить, какую культуру с меньшим риском для потери урожая следует размещать на данном поле, и т.д.).

Установленная и количественно описанная аналитическим уравнением регрессии зависимость «сорняки — урожай» математически подтверждает увеличение общей вредоносности сорняков с возрастанием их численности в посевах.

*Технологические модели фитосанитарного состояния посевов, почвы, системы управления*

По результатам научных исследований и передового опыта сельскохозяйственного производства разработаны модели фитосанитарного состояния посевов и почвы (Баздырев, 2004). Модели представлены в табл. 9. Таблица 9 Примерные модели фитосанитарного состояния посевов и почвы для Нечерноземной зоны России

Показатель	Параметры модели фитосанитарного состояния		
	плохого	среднего	оптимального
Засоренность*: потенциальная, шт./га, актуальная, шт./м <sup>2</sup>	3 млрд	До 1 млрд	100—300 млн
	Более 100	До 50	эпв**
В посевах зерновых	150-300	30-50	10-25
	10-30	5-20	2-5
В посевах пропашных	50-120	10-20	5-15

	10-20	5-10	1-2
На картофеле и овощных культурах	30-90	10-20	5-20
	5-10	3-5	1-2
В посевах многолетних	150-250	30-50	15-3
	20-25	10-15	3-5
Болезни **, %:			
зерновых	50	30	20
	40	20	10
картофеля и овощных культур	60	40	20
	50	30	10
Вредители, шт./м:			
в посевах зерновых	100	50	10
на картофеле и овощных культурах	50	20	5

*Примечание:* \* — в числителе — малолетние сорняки, в знаменателе — многолетние; \*\* — в числителе — развитие болезни, в знаменателе — пораженность; \*\*\* — ЭПВ (экономический порог вредоносности).

На основе данных эффективности элементов системы земледелия можно разработать оптимальную модель интегрированной защиты культурных растений. Согласно такой модели все методы и способы подавления вредных организмов рассматриваются и применяются в совокупности как дополняющие друг друга и органически связанные между собой, а не как самостоятельные приемы. Это позволяет более полно использовать все регулирующие факторы элементов системы земледелия, тем самым создавая благоприятные условия для восстановления оптимального фитосанитарного состояния посевов и почв. Хотя отдельные приемы отличаются очень высокой эффективностью.

Для оценки эффективности интегрированной защиты растений в системе земледелия можно разработать и применить математическую модель с большой точностью прогнозирования.

На примере засоренности такая модель имеет следующий вид:

где  $Z_a$  — засоренность актуальная;  $Z_p$  — запас всхожих семян в слое почвы 1 — 10 см;  $K$  — коэффициент всхожести;  $X_x, \dots, X_n$  — биологическая

эффективность (подавление или увеличение численности сорняков) в результате действия приемов и элементов системы земледелия.

Эффективность подавляющего действия того или иного мероприятия определяют путем вычитания из единицы коэффициента действия приема, выраженного в десятых долях. В условиях, когда приемы, наоборот, способствуют увеличению засоренности, коэффициент подавления может быть выше единицы.

Разрабатываются целые системы управления сорным компонентом (СУСК) агрофитоценоза, основанные на применении различных типовых концептуальных моделей с учетом его структурных особенностей (Захаренко, 2000). В такой системе учитываются основные особенности агрофитоценозов: неустойчивость, постоянное антропогенное воздействие, краткосрочность существования, цикличность, упрощенная структура, разные по биологии и агротехнике возделывания культурные растения, отчуждение энергии в виде основной и побочной продукции.

Алгоритм СУСК представляет собой комплекс последовательных мероприятий, на основе которого осуществляется адекватное регулирующее воздействие на сорный компонент агрофитоценоза для достижения соответствия его параметров заданному уровню. Такие алгоритмы разрабатывают для каждой культуры севооборота с учетом биологических особенностей и требований агротехники ее возделывания.

Хотя для построения алгоритмов систем управления сорным компонентом используется информация, полученная на базе многолетних стационарных многофакторных полевых опытов, заложенных в типичных для данной зоны почвенно-климатических условиях, прогностические оценки часто страдают неточностью. Возникает необходимость постоянной корректировки, расширения и уточнения информации по исходным данным и применяемым моделям.

#### *Компьютерные программы в защите растений*

Для борьбы с наиболее вредоносными и широко распространенными вредными объектами в агрофитоценозах можно применять специальные компьютерные программы. Они позволяют принимать более точные решения, оправданные экономически и экологически. В основе их практически всегда находятся пороги вредоносности или борьбы.

По своему назначению различают:

- 1) комплексные, детерминистические имитационные модели, или компьютерные программы. На практике в Германии используют следующие (Защита растений в устойчивых системах земледелия, 2003):
  - • *SIMCERC* — для принятия решений в борьбе с церкоспореллезом озимой пшеницы и ржи (возбудитель *Pseudocercospora herpotrichoides*);
  - • *SIMLA US* — вспомогательное средство для уменьшения затрат на мониторинг посевов и установления оптимального срока применения мер борьбы против злаковых тлей (*Sitobion avenae* и др.), являющихся также переносчиками вирусов, в посевах озимой пшеницы;

- • *SIMPHYT*1,2 — эти модели определяют начало эпифитотии фитофтороза (возбудитель *Phytophthora infestans*), сроки первой и последующих обработок посадок картофеля фунгицидами, дают рекомендации по тактике их применения;

- • *SIMPLEP* 1,2 — эти модели симулируют популяционную динамику колорадского жука (*Leptinotarsus decemlineatd*) с момента его появления после перезимовки, являются вспомогательным средством для прогностического определения оптимальных сроков мониторинга полей, для принятия решений и проведения мер борьбы с этим вредителем;

- • *CERC BET* — модель определяет начало эпифитотии церкоспороза (возбудитель *Cercospora beticola*) в посевах сахарной свеклы и дает рекомендации для начала мониторинга на полях данного региона;

- 2) модели температурных сумм и погодозависимых факторов, в том числе свободных от поражения болезнями периодов (фаз) роста и развития культурных растений. Самое широкое применение из них имеют «отрицательные прогнозы» для установления срока первого опрыскивания фунгицидами посадок картофеля против фитофтороза.

Все эти модели для принятия решений по конкретному полю используют данные ближайшей метеостанции о метеорологических условиях или о микроклиматической ситуации в посевах.

Имеется тип моделей, в которых не используются рекомендации на основе прогнозов, базирующихся на метеорологических данных, а определяются физиологические пороги развития возбудителей болезней, которые получают экспериментальным путем на основе поражения растений на индикаторных ярусах листьев растений (флаговый лист, 1-й лист под флаговым листом, 2-й лист под флаговым листом и т.д.).

Одновременное появление разных возбудителей болезней анализируют экспертные программы (системы). Первая такая система под названием *EPIPRE* (*Epidemics — Prediction — Prevention*), что означает «эпидемия — прогноз — предотвращение», была разработана в 70-е гг. XX в. и успешно применена в хозяйствах Голландии и Швейцарии. На ее основе производители сельскохозяйственной растениеводческой продукции за определенную плату получали вспомогательную информацию для принятия решения о мерах борьбы против ржавчины, мучнистой росы, септориозов листьев и колоса, а также зерновых тлей в посевах озимой пшеницы. В центральном компьютере на основе характеристик конкретного поля (почвенная, агротехническая), данных ближайшей метеорологической станции и результатов фитосанитарного мониторинга фермерам подготавливали рекомендации для проведения мер борьбы на данном поле в критические фазы роста и развития пшеницы. В настоящее время практическое применение этой системы в этих странах низкое, так как, регулярно пользуясь рекомендациями и освоив методики фитосанитарного мониторинга, фермеры сами научились принимать правильные решения по борьбе с вредными организмами.

В Германии в последние годы получила широкое применение экспертная система *PROPLANT*, разработанная на основе многолетних полевых

экспериментов и практического опыта выращивания зерновых для защиты их от болезней (Защита растений в устойчивых системах земледелия, 2003). Впоследствии она распространилась на вредителей озимого рапса, болезни (листьев) сахарной свеклы, сорняки в посевах кукурузы, фитофтороз картофеля. Данная программа предлагается в сети Интернет.

Однако следует помнить, что при этой и любой другой системе от пользователя требуется точный фитосанитарный мониторинг и диагностика вредных организмов на конкретном поле. В результате получают рекомендации по борьбе с определенными вредными организмами на конкретном поле с учетом сорта, вида почвы и севооборота. В основу этих рекомендаций заложены условия погоды и появление или дальнейшее развитие популяций вредных организмов.

Комплексная консультационная система *ISIP (Informations — System — Integrierte — Pflanzenproduktion)*, обозначенная как информационная система интегрированного растениеводства, представляет собой объединенный интернет-портал федеральных земель Германии (Защита растений в устойчивых системах земледелия, 2003). Его адрес в сети Интернет — [www.isip.de](http://www.isip.de); информацию можно получить также по факсу, E-Mail и SMS.

Основой рекомендаций консультационной системы *ISIP* являются результаты мониторинга на более чем 1000 контрольных полях, региональные модели прогноза на основе данных более 200 метеорологических станций, специфические рекомендации из 50 консультационных пунктов и широкий банк данных. Предлагаются модели прогноза для борьбы с церкоспореллезом пшеницы и ржи, с фито- фторозом картофеля, церкоспорозом сахарной свеклы; дается информация о региональном развитии пораженности зерновых культур, картофеля и сахарной свеклы важнейшими листовыми болезнями.

В Германии для борьбы с сорняками на практике широко применяют компьютерные программы, которые связаны между собой и экспертными системами. Они конкретизируют решения о применении гербицидов на определенном поле в хозяйстве. Например, решения о необходимости применения гербицидов на зерновых культурах принимаются на основе компьютерной программы *Herbexpert* (Защита растений в устойчивых системах земледелия, 2003).

Компьютерные программы в своем большинстве ориентированы на отдельные вредные организмы. Они не учитывают взаимосвязи с другими возбудителями болезней и вредителями и побочное влияние проведенных мероприятий.

Компьютеризация мониторинга, прогноза, принятия решений о применении мер борьбы с вредными организмами находится в динамичном развитии, и все модели и программы могут иметь только вспомогательный характер. Несомненно, модели и программы могут значительно облегчить работу по защите растений от вредных организмов в агрофитоценозах, снизив при этом трудовые и материальные затраты, оптимизировать решения, повысив тем самым эффективность работы. Однако следует понимать, что они не могут

заменить профессиональных знаний специалистов по защите растений в сельскохозяйственном производстве.

### *Основы моделирования для защиты окружающей среды*

Важной задачей развития сельского хозяйства в современных условиях является нахождение компромисса между экономическими целями и отношением к окружающей среде. В связи с интенсивным ведением сельскохозяйственного производства в мире возрастают проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды пестицидами и внесением высоких доз минеральных удобрений, особенно азотных.

Для моделирования экономических процессов принятия решений на уровне сельскохозяйственного предприятия (например, фермы) часто применяется линейное программирование (Ольховая, Яшкова, 2002). Эти методы представляют собой набор предложений в виде определенных способов деятельности и удовлетворяют требованиям научных исследований по интегрированной защите растений и защите окружающей среды. При этом: а) множество способов деятельности и ограничений на них рассматриваются в единой модели;

- б) обеспечена процедура поиска точного и действенного оптимума;
- в) результаты изменений переменных величин могут быть легко подсчитаны; г) новые способы деятельности (приемы, методы) могут быть легко включены путем добавления переменных в модель.

Целевой функцией (задачей) является максимум дохода предприятия с учетом уменьшения применения пестицидов и наименьшего снижения при этом урожайности сельскохозяйственных культур. В данном случае модель оптимизации производственной структуры сельскохозяйственного предприятия с элементами защиты окружающей среды, кроме обычных вопросов, таких как определение оптимального набора культур, способов и технологий их культивирования, обеспечения трудом и денежными затратами, содержит дополнительные компоненты, включающие экологические параметры для возделывания культур.

Переменными величинами такой модели в основном являются:

- 1. Площади посева культур по полям севооборотов с детализацией по каждой культуре по способам внесения удобрений и способам защиты растений. Например, по картофелю принята следующая детализация: по полям севооборота — 4; контролю нематод — 5; методам внесения азота — 3; контролю защиты от колорадского жука — 2; борьбе с фитофторозом — 2; борьбе с сорняками — 2.

- 2. Площади возделывания культур по разной технологии: по методам контроля и учета, выполнению работ собственной техникой и трудовыми ресурсами и арендованной с привлечением трудовых ресурсов с разделением их на виды технологических операций (вспашка, подготовка почвы, подготовка семенного материала, посадка/ посев, уход за культурами, в том числе внесение удобрений и опрыскивание пестицидами, уборка).

- 3. Привлеченный труд по периодам в 14 дней в часах.

- 4. Новые машины по уходу за культурами: опрыскиватели, агрегаты для борьбы с сорняками.

- 5. Пестициды по видам в килограммах действующего вещества.

Ограничениями модели являются:

- 1. Площадь посевов.

- 2. Чередование культур в севооборотах.

- 3. Труд по периодам в 14 дней.

- 4. Привлечение сезонных рабочих.

- 5. Взаимосвязь переменных по культурам и технологии их возделывания.

- 6. Взаимосвязь переменных по культурам и применению новых машин.

- 7. Потребность в пестицидах.

- 8. Объем использования пестицидов и удобрений.

Ограничение на объем использования пестицидов и удобрений

обусловлено ограничением максимальной концентрации пестицидов и нитратов в почве, подземных водах, их остаточные количества в растениеводческой продукции.

Модель учитывает разные варианты цен на продукцию, пестициды и удобрения, дает рекомендации фермерам по оптимальной структуре посевов, применению удобрений и пестицидов для получения максимального дохода при возделывании экологически чистых продуктов и соблюдении требований окружающей среды.

Вопросы для повторения

- 1. Чем обосновано применение моделирования для защиты растений?

- 2. Какой вид могут иметь кривые сезонной динамики эпифитотического процесса у возбудителей ржавчинных заболеваний и корневых гнилей?

- 3. На основе каких закономерностей предложены номограммы для определения инкубационного периода фитофтороза картофеля, желтой и бурой ржавчины пшеницы?

- 4. Написать формулу простейшей модели изменения популяций во времени для болезней, передающихся с воздушными потоками.

- 5. Какие факторы лежат в основе системы управления сорным компонентом (СУС К)?

- 6. Привести пример математической интерпретации зависимости «сорняки — урожай».

- 7. Какие биологические параметры прежде всего определяют уровень динамики численности насекомых?

- 8. Какие метеорологические показатели обязательно учитывают при составлении прогнозов вредных насекомых и составлении моделей их динамики и вредоносности? Почему?

- 9. Какие компьютерные программы и системы используются в России и за рубежом для моделирования в интегрированной защите растений?

- 10. Какие преимущества дает использование компьютерных программ для моделирования?

- 11. Какие недостатки существуют при использовании компьютерных программ для моделирования?

- 12. Что является основными и переменными величинами модели элементов защиты окружающей среды?