

ТИПИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ АГРОЭКОСИСТЕМ

В. В. Москвин

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 22.02.2011 г.

Аннотация. Проведен анализ основных типов агроэкологических моделей. Выявлены их основные особенности и отличия. Кратко охарактеризовано информационное обеспечение различного типа моделей агроэкосистем.

Ключевые слова: статистические, эмпирические, динамические, диффузные, балансовые, компартментальные, модели, моделирование, агроэкосистема, агроценоз, информационное обеспечение.

Abstract. The analysis of the basic types of agroecological models is carried out. Their basic features and differences are revealed. Information support of various types of models of agroecosystems it is short characterized.

Keywords: statistical, empirical, dynamic, diffusive, balance, compartmental, models, modeling, an agroecosystem, agrocinososis, information support.

ВВЕДЕНИЕ

Для современного почвоведения характерна общая тенденция математизации научных исследований. Если раньше применение математики в почвоведении ограничивалось использованием статистических методов для обработки экспериментальных данных, то сейчас все больше внимания уделяется математическому моделированию.

Математическое моделирование почвенных процессов относительно молодое научное направление, которое начало развиваться в середине 60-х годов прошлого столетия с появлением мощных ЭВМ и разработкой методов моделирования сложных динамических систем — системного анализа. Системный анализ это рецептурная реализация общеметодологического научного принципа — системного подхода. Этот подход всегда был органически присущ русскому почвоведению [17].

Кроме того, в почвоведении потребность моделирования диктуется необходимостью принятия правильного решения при подготовке мелиоративных или иных мероприятий, когда требуется предсказать последствия, просчитать возможные эффекты и выбрать оптимальный вариант [21].

Важно, чтобы построенные модели отражали основные связи между наиболее существенными факторами изучаемых процессов и воспроизводили их главные составляющие, тогда такой подход при условии соответствующей системы землепользования может служить основой для управления

режимами почв. Так, например, модели водно-солевого режима (ВСР) могут применяться при проектировании оросительных и дренажных систем, а также служить хорошей основой для разработки соответствующих режимов и их эксплуатации [17].

В настоящее время создано огромное количество различных почвенных (агроэкологических) моделей, описывающих различные свойства почвы, ее процессы и режимы, что сильно затрудняет выбор подходящей модели в каждом конкретном случае. В соответствии с этим была поставлена цель: сделать краткий обзор и дать характеристику наиболее распространенным моделям агроэкосистем, разделив их на основные типы по области применения; выявить необходимое информационное обеспечение для соответствующих типов моделей.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Статистические модели строятся при допущении, что исследуемый процесс случаен и может быть изучен с помощью статистических методов анализа систем. Они включают: эмпирические и динамические статистические методы, корреляционный и факторный анализ, многомерное шкалирование, анализ временных рядов. Для снижения размерности статистических моделей используется ряд методов, например выделение главных компонент в регрессионных уравнениях и гармонических рядах.

К статистическим относят модели прогнозирования урожаев, основанные на учете агроклимати-

ческих ресурсов региона. Такие модели разрабатываются в агрометеорологии. Для оценки потенциальной продуктивности используются величины баланса фотосинтетически активной радиации (ФАР), а также комплексные показатели — биоклиматический и гидротермический потенциалы продуктивности (БКП, ГТП) [13].

Эмпирические модели представляют собой регрессионные уравнения, связывающие конечный результат (урожай и показатели его качества) с действующими величинами (факторами), и представлены в основном так называемыми производственными функциями. Область их применения весьма широка, в почвоведении они используются главным образом в педотрансферных¹ функциях для вычисления физических характеристик почвы по имеющимся данным. К таким функциям предъявляется ряд требований: они должны учитывать основные факторы, оказывающие влияние на результирующий признак, и охватывать широкий диапазон их значений, а аппроксимирующая функция должна максимально соответствовать реальным биологическим закономерностям. Важный вклад в создание эмпирических моделей внесли работы Т. И. Ивановой, А. Д. Воронина, Е. В. Шеина, А. В. Дембовецкого и других исследователей [2, 6, 18, 21].

К эмпирико-статистическим (регрессионным) относятся многие модели почвенной эрозии. Кроме того, такие модели часто применяются в фитопатологии для описания динамики эпифитотий.

Динамические модели предназначены для прогнозирования и оперативного управления продукционным процессом с учетом складывающейся агрометеорологической обстановки. В основе динамического моделирования лежит описание системы с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных, параметры которых определяют по эмпирическим данным.

Физико-статистические модели рассматривают систему как совокупность взаимодействующих элементов со случайными свойствами. В модель вводится функция распределения показателей состояния и глобальная характеристика взаимодействия компонентов (энтропия, энергия или вещественный результат). Область применения рассматриваемых моделей ограничивается описанием неструктурированных гомогенных систем, когда

¹ Педотрансферные функции — это функциональные соотношения, которые доступные почвенные (ped) свойства (например, текстура, структура, содержание органическое углерода и др.) переводят (transfer) в недостающие (например, почвенно-гидрологические характеристики).

необходимо оценить воздействие многих факторов на результирующий признак. В таких моделях урожай культур рассматривается как эмпирическая функция отклонения факторов среды (параметров агрохимической характеристики, влагозапасов, температуры воздуха) от оптимальных значений. К физико-статистическим относятся и так называемые марковские модели [7]. Они представляют развитие системы в виде разветвленной сети состояний. Вероятности переходов в общем случае могут зависеть не только от текущего положения системы, но и от того, как система достигла его.

Комплексные имитационные модели призваны повысить адекватность агроэкологических прогнозов за счет качественно более полного использования эмпирических данных. Имитационные модели призваны формализовать с помощью ЭВМ любые эмпирические сведения об объекте. Причинно-следственные связи в имитационных моделях прослеживаются не до конца. Это позволяет анализировать системы в условиях большой размерности и неполной информации об их строении, более результативно использовать знания предметной области. Структура имитационных систем, как правило, включает аналитическое описание объекта, блоки экспертных оценок, имитации и обработки результатов вычислительного эксперимента.

Показано, что при построении комплексных имитационных моделей геоэкологических региональных уровней наибольший эффект достигается использованием следующих классических свойств сложных систем:

- сложным системам свойственно скачкообразно изменять свое поведение, переходя из одного квазистационарного состояния в другое;
- для характеристики сложной системы достаточно оценить некую группу ее свойств (системообразующих факторов), которые важны с точки зрения функционирования системы более высокого уровня. Их количественные оценки представлены интегральными показателями основных, наиболее важных свойств системы, характеризующих ее состояние в целом.

Формализацией комплексных имитационных моделей может быть дискретная схема, действующая по типу: критерий (интегральный показатель) → состояние (тип) + воздействие → отклик (изменение состояния). Абстрактное понятие «состояние» соответствует понятию «типа» (например, в географии, почвоведении), а изменение объекта (например, биогеоценоза) во времени представляется как переход от одного типа к другому.

В 80-е годы прошлого века для комплексных имитационных моделей теоретически обоснована и построена общая концепция, позволяющая математически интерпретировать сущность интегральных показателей при имитации динамики гео- и агроэкологических систем, и предложен алгоритм их построения: для климата, агрометеорологических условий, почвы и иных блоков. Специальными методами решена некорректная задача оценки численных значений параметров различных блоков. Выбраны и программно реализованы методы управляющих параметров в алгебро-дифференциальных уравнениях с «жесткой» структурой при их интегрировании [11, 13, 20].

Эти разработки использованы в Автоматизированной системе регионального экологического прогноза (АСРЭП). Она предназначена для оценки изменения состояния растительности (в том числе лесов и сельскохозяйственных культур), почв, запасов и качества грунтовых вод, гидросети, загрязненности природно-территориальных комплексов (ПТК) размером от 50 до 5 000 кв. км. Моделируются воздействия различных поллютантов (промышленных, пестицидов, радионуклидов и иных), изменение земельного фонда, межрегиональные влияния, тенденции смены климатических и погодных условий. На основе модельных расчетов дается прогноз состояния возобновляемых ресурсов сроком от 3 до 60 лет и оценивается ретроспектива развития ситуации; прослеживается динамика более трехсот параметров, характеризующих природную среду. Система сертифицирована органами государственного управления, рекомендована к использованию и широко применяется для решения практических задач, в том числе при экологическом обосновании стратегии развития земледелия в Центральном Черноземье и других регионах [8, 9, 14].

Важным блоком описанных моделей является так называемая функция «распознавание образов» (РО). Распознавание образов — направление исследований, связанное с разработкой процедур определения принадлежности объекта к одному из заранее выделенных классов (образов). РО применяется для дешифрирования аэро- и космических фотоснимков, при дистанционной индикации почв. Дистанционная диагностика используется для идентификации очагов засоления, нефтяного загрязнения, содержания гумуса, исследования неоднородности почв и т.п. Результаты диагностики используются при составлении экологических карт различного масштаба [14]. Еще одной областью

применения статистических методов моделирования можно назвать анализ временных рядов. Он используется, главным образом, для прогноза периодических процессов по известному спектру частот [4]. На основе этого метода в агрометеорологии приняты расчеты многолетних циклов продуктивности агроценозов по повторяющимся астрономическим явлениям.

К статистическим моделям в агроэкологии можно также отнести базы данных, содержащие параметры статистических распределений показателей состояния почв (морфологических, химических, физических и других), а также результатов полевых агрохимических экспериментов. Имеется опыт использования агрохимических банков данных при построении моделей продуктивности агроценозов [9, 16].

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Областью применения динамических моделей является расчет потоков вещества и энергии в относительно гомогенных или приближенных к ним средах. В почвоведении уравнения диффузии используются для расчета температурных, концентрационных и иных полей в почвенной массе. Между тем, объекты со сложной внутренней структурой являются наиболее интересными для моделирования. Адекватность расчетных оценок при работе с весьма сложной и гетерогенной средой, где параметры правой части уравнений являются функциями времени и изменяются в трехмерном пространстве, достаточно низкая. Поэтому их использование ограничено преимущественно теоретическими задачами, а в сельскохозяйственной практике используются эмпирические зависимости [5].

Балансовые модели описывают динамику систем как совокупность процессов переноса вещества и энергии. В качестве математического аппарата используются обыкновенные дифференциальные уравнения. Частным случаем являются так называемые компартментные² модели. Они представляют объект в виде резервуаров (компартментов) и связующих их каналов.

Концептуально-балансовое (компартментное) моделирование имеет большое значение в изучении биологического круговорота элементов в почвоведении и геохимии. Модели геохимических циклов описывают миграцию и накопление зольных элементов в системе «почва-растение», формирование биомассы и изменение запасов органического вещества почвы [9, 10].

² От франц. *compartement* — отсек, купе.

Органическое вещество почв играет ключевую роль в обеспечении буферности, устойчивости и безопасности агроэкосистем. Предложенная И.М. Рыжовой модель описывает баланс углерода в системе «почва-растение» с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Рассматривается изменение запаса гумуса в почве, подстилке, ежегодная продукция, скорости гумификации, минерализации растительных остатков и гумуса. Показано, что модель корректно описывает изменение содержания гумуса в зональных типах почв [15, 17].

А. И. Морозов и В. О. Таргульян [11] предложили идеализированную модель процесса элювиально-иллювиальной дифференциации профиля почв и кор выветривания в кислых условиях. В основе модели — система дифференциальных уравнений, описывающая динамику разрушения минеральной части почвы и выноса органоминеральных соединений вниз по профилю. Моделирование позволило воспроизвести основные кинетические характеристики процесса — константы диссоциации фульвокислот и величины устойчивости органоминеральных соединений.

На основе балансовых расчетов построена глобальная модель эмиссии диоксида углерода почвами мира [8]. Показано, что в ближайшее время природный источник поступления CO_2 будет преобладать над техногенным. Поэтому процесс глобального потепления климата следует связывать, прежде всего, с разрушением органического вещества почв и их деградацией.

На этой же основе ведутся работы по оценке устойчивости и безопасности агроэкосистем, прогнозированию последствий глобального изменения климата и химического состава природной среды. Однако, результаты теоретических разработок (за исключением, радиационной безопасности), до сих пор не нашли отражение в критериях оценки реальных экологических ситуаций и соответствующих нормативно-правовых документах [1].

Прогнозирование доступных растениям запасов почвенной влаги имеет большое значение в мелиоративных расчетах. Одним из используемых для этого подходов является послойно-балансовое моделирование. Е.М. Гусевым и О.Н. Насоновой предложена методика определения влагозапасов на основе учета динамики составляющих водного баланса почвы в течение годового цикла [3].

Таким образом, балансовые модели являются основным инструментом изучения динамики гетерогенных систем, однако, они не способны пере-

дать смену их состояний и изменение кинетических характеристик. Для этого предложены модели автоматного типа с дискретно-переменными скоростными коэффициентами. Их особенностью является различия в скорости протекания изучаемых процессов, а описывающие их системы дифференциальных уравнений получили название жестких. В последнее время для решения «жестких» систем уравнений предложены явные схемы с управляющими параметрами.

Матричные модели представляют динамику объекта в виде последовательной смены состояний:

$$a(t+1) = A \cdot a(t) \quad (1)$$

где a — вектор характеристик объекта, A — квадратная матрица воздействий, t — время.

В общем случае матрица A может быть переменной, и ее элементы будут зависеть от времени. Матричные модели применимы, если динамика свойств объекта представима в виде линейной рекурсии. Это справедливо для квазистационарных состояний, когда режим функционирования системы не меняется. Рассматриваемый тип моделей используется преимущественно для описания динамики популяций в экологии [7, 17].

Модели теории исследования операций (ТИО) решают задачу оптимального управления в условиях, когда доступные ресурсы ограничены, т.е. регламентированы значения переменных. Оптимизационные модели — основа автоматизированного проектирования сельскохозяйственных технологий. Известны модельные разработки планирования хозяйственного использования земель в условиях радиоактивного загрязнения, оптимизации агротехнологий по принципу «игр с природой» [3, 8, 11].

Специфические индивидуальные модели служат для описания узкого круга процессов, например взаимодействий типа «хищник-жертва». Попытки их обобщения для прогнозирования динамики больших систем сталкиваются с существенными трудностями [19].

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ АГРОЭКОСИСТЕМ

Информационное обеспечение математических моделей агроэкосистем включает в себя системы поддержки принятия решений (СППР), геоинформационные системы (ГИС), системы управления базами данных (СУБД), системы, основанные на знаниях (СОЗ), автоматизированные системы управления (АСУ), системы автоматизированного проектирования (САПР), среды имитационного

моделирования. Для персональных компьютеров и рабочих станций предложены системы, реализующие языки имитационного моделирования (SLAM II, GPSS, SIMULA, DINAMO). Для хранения и представления картографической информации используются геоинформационные системы (ГИС) [3, 6]. В настоящее время в Российской Федерации ведется работа по созданию единого цифрового фонда общегеографических и тематических карт масштаба 1:10000—1:1000000, создан ряд региональных ГИС (Север, Байкал, Рязань). Версии для ПК имеют картографические системы: ARC/INFO, pMAP, IDIRSI (США), TERRASOFT, PAMAP, SPANS, COMPUGRID/STRINGS (Канада), CLIMEX (Австрия), SICAD (Германия) и другие. Имеется опыт использования электронных картографических материалов при составлении долговременных агроэкологических прогнозов [8, 16].

Приобрели известность интегрированные банки моделей, где на единой методической основе обобщаются различные расчетные методы. Это существенно повышает эффективность агроэкологического прогнозирования.

Модель Polmod создана в ИСА РАН. Polmod объединяет блоки прогноза динамики запасов почвенного гумуса (Polmod.Hum), содержания пестицидов (Polmod.Pest) и радионуклидов (Polmod.Rad) в различных компонентах экосистем.

Банк моделей плодородия ПЛОМОД (Почвенный институт им. В.В. Докучаева) объединяет модели плодородия почв агроценозов природных зон бывшего СССР. Систематизация моделей осуществлена на основе единой схемы почвенно-географического и природно-сельскохозяйственного районирования [12—14].

Проект SAMASE предусматривает создание банка моделей плодородия, ориентированного на проектирование сельскохозяйственных технологий. Все модели банка (более 250) поддерживают единый формат представления данных и взаимодействия с геоинформационной системой (ГИС) [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Каждый из рассматриваемых в данной статье типов моделей имеет как недостатки, так и преимущества в отношении масштаба охватываемой территории, точности результатов и т.д., кроме того, для каждого типа необходим конкретный набор параметров, которые задают вектор начального состояния моделируемой системы и обеспечивают модельный процесс на всех его этапах.

В идеальном случае при принятии конкретных решений на практике могут найти применение практически все рассмотренные выше типы моделей. Тем не менее, при выборе той или иной модели следует исходить, прежде всего, из целей моделирования и возможностей обеспечить модель информацией. То есть, исследователю сначала необходимо ответить на вопрос что мы будем моделировать и для каких целей, и какие результаты (в т.ч. по точности) требуется получить, а также какими возможностями экспериментально обеспечить модель данными мы располагаем. И, исходя из этого, уже следует выбирать модель среди существующих, либо создавать новую.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков А. А. Проблемы анализа безопасности человека, общества и природы / А. А. Быков, Н. В. Мурзин. — СПб. : Наука, 1997. — 247 с.
2. Воронин А. Д. Использование почвенно-гидрологических констант для расчета гидрофизических характеристик / А. Д. Воронин, А. К. Губер, Е. В. Шеин // Почвоведение. 1986. №4. С. 630—634.
3. Гусев Е. М. Моделирование годовой динамики влагозапасов корнеобитаемого слоя почвы для агроэкосистем степной и лесостепной зон / Е. М. Гусев, О. Н. Насонова // Почвоведение. 1996. — № 10. — С. 1195—1202.
4. Дикусар В. В. Методы теории управления при численном интегрировании обыкновенных дифференциальных уравнений / В. В. Дикусар // Дифференциальные уравнения. — 1994. — Т. 30. — № 12. — С. 2116—2121.
5. Зайдельман Ф. Р. Мелиорация почв / Ф. Р. Зайдельман. — М. : Изд-во МГУ, 1996. — 384 с.
6. Иванова Т. М. Прогнозирование эффективности удобрений с использованием математических моделей / Т. М. Иванова. — М. : Агропромиздат. 1989. — 235 с.
7. Колесов Ю. Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы / Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сеничев. Учеб. пособие. — СПб. : БХВ-Петербург, 2006. — 224 с.
8. Кудяров В. Н. Оценка дыхания почв России / В. Н. Кудяров, Ф. И. Касимов, Н. Ф. Деева, А. А. Ильина, Т. В. Кузнецова, А. В. Тимченко. // Почвоведение, 1995, N 1. — С. 33—42.
9. Мамихин С. В. Динамика углерода органического вещества и радионуклидов в наземных экосистемах (имитационное моделирование и применение информационных технологий) / С. В. Мамихин. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 2003. — 172 с.
10. Моделирование почвенных процессов в агроэкосистемах : учеб. пособие / Р. А. Полуэктов [и др.]. — СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2002. — 148 с.
11. Морозов А. И. Идеальная модель развития элювиального горизонта в почвах и корах выветривания /

- А. И. Морозов, В. О. Таргульян // Почвоведение. — 1995. — № 7. — С. 897—903.
12. *Морозов В. В.* Исследование операций в задачах и упражнениях / В. В. Морозов, А. Г. Сухарев, В. В. Федоров. — М.: Высшая школа, 1986. — 319 с.
13. *Образцов А. С.* Системный метод: применение в земледелии / А. С. Образцов. — М.: Агропромиздат, 1990. — 303 с.
14. Обучающиеся системы обработки информации и принятия решений / А. В. Лапко [и др.]. — Новосибирск : Наука, 1996. — 284 с.
15. *Орлов Д. С.* Органическое вещество почв Российской Федерации / Д. С. Орлов, О. Н. Бирюкова, Н. И. Суханова. — М.: Наука, 1996. — 244 с.
16. *Прохорова З. А.* Изучение и моделирование плодородия почв на базе длительного полевого опыта / З. А. Прохорова, А. С. Фрид. — М.: Наука, 1993. — 189 с.
17. *Рыжова И. М.* Математическое моделирование почвенных процессов / И. М. Рыжова. — М.: Изд-во МГУ, 1987. — 86 с.
18. Теории и методы физики почв / [под ред. Е. В. Шеина и Л. О. Карпачевского]. — М.: «Гриф и К», 2007. — 616 с.
19. *Федоров В. Д.* Экология / В. Д. Федоров, Т. Г. Гильтманов. — М.: Изд-во МГУ, 1980. — 462 с.
20. *Хомяков Д. М., Хомяков П. М.* Основы системного анализа / Д. М. Хомяков, П. М. Хомяков. — М.: Изд-во мех.-мат. ф-та. МГУ, 1996. — 107 с.
21. *Шеин Е. В.* Курс физики почв : учебник / Е. В. Шеин. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 432 с.

Москвин Владимир Владимирович — аспирант кафедры почвоведения и управления земельными ресурсами биолого-почвенного факультета ВГУ; e-mail: dzhankui@bk.ru

Moskvin Vladimir V. — Ph.D. (the post-graduate student), soil science and management chair ground resources department of biological faculty VSU; e-mail: dzhankui@bk.ru