

УДК 519.8: 502.3

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ЭКОЛОГИИ

¹Дромашко С.Е., ²Крисевич Т.О.

¹*Институт генетики и цитологии НАН Беларуси,
Беларусь, Минск 220072, ул. Академическая, 27,
тел.: +375(17)284-21-90, факс: +375(17)284-19-17,
e-mail: S.Dromashko@igc.bas-net.by*

²*Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка,
Беларусь, Минск 220050, ул. Советская, 18,
e-mail: kristaol@rambler.ru*

Метод математического моделирования в экологии, дополняя экспериментальные методы и методы наблюдения, приобретает все большее значение и актуальность.

Биосфера, являясь непрерывной, может быть мысленно дифференцирована на элементарные фрагменты, системы, между которыми нечетко определены границы. В данном контексте под системой будем подразумевать понятие экосистемы по А. Тенсли [1].

Согласно Н.Ф. Реймерсу, система – это «совокупность взаимодействующих элементов, составляющих более или менее ограниченное целостное единство» [2]. Предполагая, что морфологические или функциональные границы все-таки существуют, можно представить экосистемы как структурно-функциональные дифференциалы биосферы. Такая математическая аналогия рассматривает экосистему как «однородную и функционально полноценную часть природы», и позволяет при интегрировании перейти к описанию систем более высокого иерархического уровня. При сравнении понятия экосистемы с понятием

материальной точки для количественного решения важных экологических задач можно использовать обыкновенные дифференциальные уравнения.

Простейший пример – модель Вольтерра–Лотки для системы «хищник–жертва»:

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon_1 x - \gamma_1 yx,$$

$$\frac{dy}{dt} = -\varepsilon_2 y + \gamma_2 xy,$$

где параметры модели $\varepsilon_1, \gamma_1, \varepsilon_2, \gamma_2$ отражают рождаемость и смертность хищников и их жертв.

Более сложные взаимоотношения возможно описать с привлечением аппарата теории дифференциальных уравнений в частных производных, в частности в таком одномерном пространственном обобщении модели «хищник–жертва»:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = R(x)(x - L) \frac{K - x}{K} - bxy + D^x \frac{\partial^2 x}{\partial r^2};$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -cy + ebxy + D^y \frac{\partial^2 y}{\partial r^2},$$

где использованы следующие обозначения:

- $x(r, t)$ – плотность жертвы;
- $y(r, t)$ – плотность хищника;
- e – коэффициент переработки биомассы жертвы;
- b – коэффициент выедания;
- c – коэффициент смертности хищников;
- K – емкость среды;
- $R(x)$ – коэффициент роста жертвы;
- L – нижняя критическая численность.

Модель учитывает также, что емкость среды ограничена величиной K , и безграничный рост жертвы в отсутствие хищника невозможен. Кроме того, существует нижняя критическая численность жертвы L : если число особей

падает по каким-либо причинам ниже L , популяция вымирает. Решение уравнений модели производится приближенными методами на ЭВМ.

Для математического описания экологических систем используются также общая теория систем и кибернетики. Понятие системы является центральным в системном моделировании. В данном случае под системой понимают совокупность объектов, которые образуют некоторую целостность (рис. 1). В этом случае проявляется принцип эмерджентности [3].

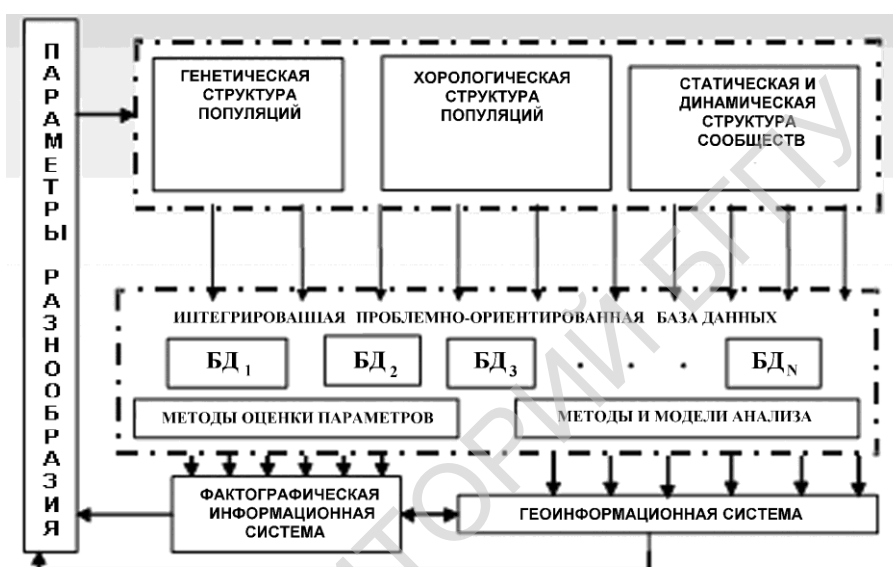


Рис. 1. Функциональная схема информационных потоков при модельных исследованиях структуры биосистем (по [4]).

Чем больше элементов в изучаемой системе, тем сложнее бывает проведение информационного анализа. Так, в двухкомпонентной системе необходимо учитывать связь между ее частями. Появление третьего элемента (или фактора) осложняет ситуацию так называемой «связью между связями». В системе из четырех элементов приходится учитывать связь между одной из частей и комплексом связей и т.д. Кроме того, в системах, состоящих из большого числа элементов, возможен эффект объединения, когда некоторые компоненты системы сильно взаимодействуют между собой, выступая как единое целое по отношению к остальной части системы.

Исходным этапом изучения некоторой системы является определение ее границ. Все объекты делятся на два класса по принципу принадлежности или

непринадлежности системе. Объекты, принадлежащие системе, являются ее элементами, не принадлежащие – образуют внешнюю среду. В системном анализе граница разделения элементов системы и элементов среды четкая.

Согласно общей схеме системного подхода формула, описывающая некоторую наземную экосистему имеет вид:

$$E=S(V, X, Y, \Sigma, F, G, K, L), \text{ где}$$

$V=\{v_1, \dots, v_k\}$ – множество входов; $X=\{x_1, \dots, x_k\}$ – множество переменных состояний; $Y=\{y_1, \dots, y_k\}$ – множество выходов; Σ – структура; F – функция перехода; G – функция выхода; L – закон эволюции.

Все математические модели подобны реальной системе-оригиналу. Построение модели сложной системы может сопровождаться построением нескольких моделей систем-оригиналов. Это принцип многомодельности системного моделирования.

К числу наиболее простых и общих информационных моделей относится модель типа «черный ящик» (рис. 2). В них внутреннее устройство неизвестно или скрыто. Внутренний состав, внутренняя структура, координаты, законы эволюции, внутренняя динамика не учитываются и формула, описывающая экосистему принимает вид:

$$E=S(V, Y, G)$$

Система не является полностью изолированной, так как внешняя среда будет оказывать какое-то воздействие. Эти воздействия – входные переменные $V=(v_1, \dots, v_2)$. Среди входных переменных имеется особый класс управляющих переменных, под воздействием которых на систему оказывается целенаправленное действие. Выходные переменные $Y=(y_1, \dots, y_k)$ показывают, что система также оказывает влияние на окружающую среду или другие системы.

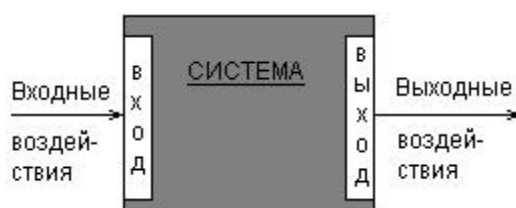


Рис. 2. Графическое изображение модели системы в виде «черного ящика».

В процессе системного моделирования можно выделить следующие этапы:

1. Логическое осмысление проблемы посредством анализа всех доступных ресурсов.
2. Построение соответствующей предметной области и адекватной модели системы с уточнением ее границ.
3. Выполнение вычислительных экспериментов.
4. Применение результатов.
5. Коррекция или доработка модели системы.

При построении динамической модели решающее значение имеет установление связи между основными свойствами объекта и диагностическими характеристиками, как это показано, например, на рис. 3 [5].

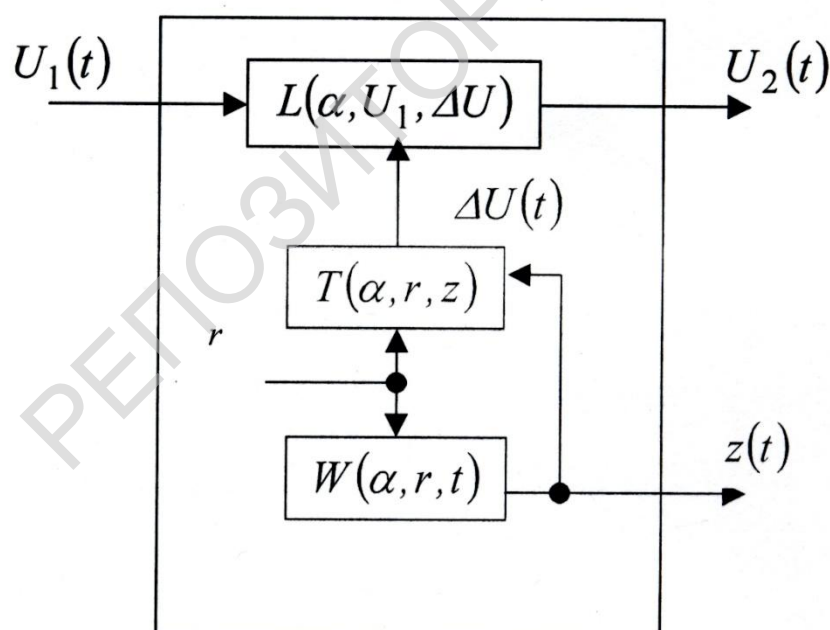


Рис. 3. Структурная схема диагностической модели сложной технической системы.

L – оператор; $U_1(t)$ – входные переменные; $U_2(t)$ – выходные переменные; $\Delta U(t)$ – возмущающий фактор; α – конструктивные параметры; $z(t)$ – изменение собственных колебаний; r – параметр, связывающий $\Delta U(t)$ и $z(t)$; T – оператор, устанавливающий связь между $\Delta U(t)$, r , $z(t)$; W – оператор, устанавливающий связь между r и $z(t)$.

Для моделирования динамики сообществ применяют ценотические модели, построенные на базе автономных систем обыкновенных дифференциальных уравнений относительно плотностей популяций $N_i(t)$:

$$\{dN_i/dt=f_i(N_1, N_2, \dots, N_m) \quad (i=1, 2, \dots, m),$$

где функции f_i характеризуют структуру сообщества.

Этот подход к моделированию позволяет расширить представления о фазовом портрете биотических сообществ. Элементарными типами динамического поведения биотических сообществ являются жесткоустойчивое равновесие, колебательно-устойчивое равновесие, устойчивый предельный цикл, ограниченные непериодические колебания. Ценотические модели позволяют теоретически описать такие явления в экологии, как бифуркации, мультистабильность, «катастрофы», но при решении конкретных прогностических и оптимизационных задач в них не учитывается нестационарность, стохастичность условий существования, возрастная неоднородность внутри популяции.

С позиции теоретико-множественного формализма экосистема может быть представлена линейной компартментальной моделью:

$$E = S(V, X, Y, \Sigma, F, G),$$

где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ – множество входных переменных, $X = \{x_1(t), \dots, x_n(t)\}$ – множество переменных состояния, $Y = \{y_1, \dots, y_p\}$ – множество выходных переменных, Σ – множество уравнений, описывающих динамику переменных $x_i(t)$, F – интегральный оператор перехода для переменных состояния, G – оператор выхода. Исследования Т.Г. Гильманова [1] показали, что изучение целостных характеристик и выявление структурно-функциональных особенностей экосистемы оказались затруднительными.

Нелинейные компартментальные модели экосистем описываются такой же теоретико-множественной формулой, как и линейные компартментальные модели. Однако, в структуру Σ входит хотя бы одно нелинейное соотношение. Вследствие этого невозможно получить переходный F и выходной G операторы

в явной форме. Основным способом решения нелинейных уравнений является имитационное математическое моделирование, которое реализуется с помощью ЭВМ с применением блочного принципа. Реализация имитационного моделирования связана с большими затратами времени и материальных средств.

Для описания экосистем используются также модульные иерархические модели экосистем. Сущность подхода состоит в том, что осуществляется переход от рассмотрения неструктурированной совокупности переменных состояния X к структурированию этих переменных в связанные по содержанию подсистемы $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$, где $X_i = \{x_{i1}, \dots, x_{imm}\}$. Каждая подсистема описывается с помощью самостоятельного программного модуля:

$$X_i = S_{(i)}, V_{(i)}, X_{(i)}, Y_{(i)}, \Sigma_{(i)}, F_{(i)}, G_{(i)}, K_{(i)}, L_{(i)}$$

Множество входных переменных состоит из глобальных входных переменных экосистемы, переменных состояния, выходных переменных других модулей, которые влияют на функционирование данной экосистемы.

Одним из примеров таких моделей является модель CENTURY, которая была разработана В. Дж. Партоном в Лаборатории экологии и управления природными ресурсами университета Колорадо (США) [6] (рис. 4). Эта модель является высокопараметризованной. Она насчитывает несколько сот параметров, которые необходимо оценить для каждой моделируемой экосистемы. Но большинство из них определены заранее на основе фактических данных о механизмах соответствующих процессов либо феноменологически. В итоге на практике можно оценить лишь ограниченный набор параметров.

В экологии сильна неопределенность, много нечетких данных, как правило, невозможно контролировать условия наблюдения, т.е. понятие неопределенности относится к характерным свойствам собранной информации в экологических базах данных. Некоторые экологические данные сложно измеримы, например, количество особей в некоторой части экосистемы. Такая информация может быть получена либо методом тотального подсчета, либо

оценочными методами. С проблемой неопределенности исследователи сталкиваются при математическом моделировании в результате неточности измерения, возникновения случайных переменных и неопределенности знаний эксперта [7].

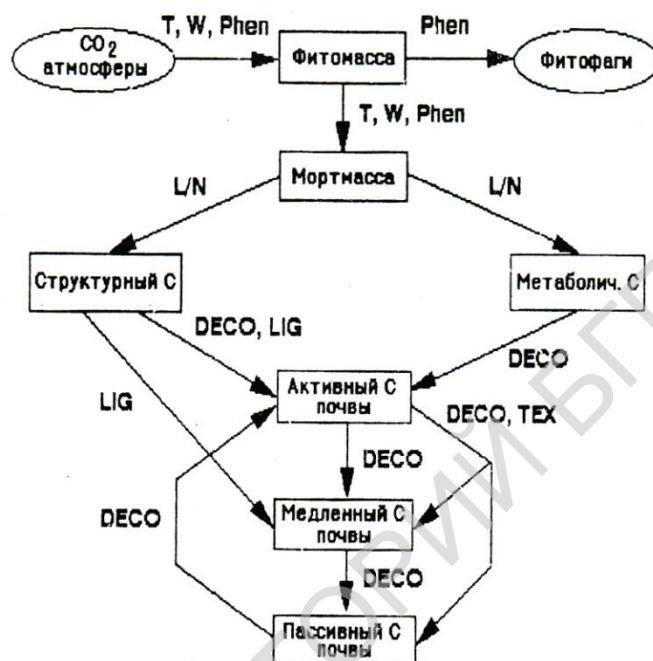


Рис. 4. Поточковая диаграмма блока модели CENTURY.

T – температура (воздуха, почвы); W – влажность почвы; L/N – отношение лигнина к азоту; LIG – содержание лигнина; TEX – механический состав почвы; $DECO$ – параметры, определяющие темпы разложения фракций органического вещества.

Довольно необычен с позиций традиционной математики и обширный материал по хроническому действию малых доз ионизирующей радиации после черновобильской катастрофы. Эти данные часто имеют уникальный характер (случай малых выборок) и демонстрируют нелинейные эффекты, зависящие от разнообразных факторов (плотность радиоактивного загрязнения, время с момента катастрофы, степень промышленной деятельности в регионе и т.п.) в различной комбинации. В этих обстоятельствах представляется необходимым строить анализ на какой-то

отличной от математической статистики методологической основе, более адекватной характеру экспериментального материала.

Одна из возможностей обойти эту неопределенность – теоретико-информационный подход, вторая возможность – использование теории нечетких множеств.

С 1960-х гг. методы теоретико-информационного анализа применялись рядом российских исследователей в дисциплинах географического профиля, например, в медицинской географии, почвоведении и геоботанике [8–10]. В отличие от указанных авторов, мы разрабатываем также и соответствующее программное обеспечение [11].

Любая сложная система состоит из частей, элементов, между которыми существуют более или менее сильные связи. Тогда наличие данных о состоянии одной части или элемента системы подразумевает наличие информации о состоянии другого, связанного с ним элемента системы. Эта информация тем больше, чем сильнее связь. С технической точки зрения любая такая взаимосвязь может быть представлена в виде канала, по которому от одного элемента к другому передается информация. Задача описания такой системы сводится, в определенной степени, к оценке эффективности передачи информации между элементами системы.

Пусть явление Y имеет m различных состояний y_1, y_2, \dots, y_m , а каждый из N факторов X_i имеет $n(i)$ различных состояний $x_1, x_2, \dots, x_{n(i)}$. Когда состояния фактора и явления x_{ij} и y_k независимы, вероятности их одновременного наблюдения связаны между собой хорошо известной формулой

$$P(y_k, x_{ij}) = p(y_k)p(x_{ij}).$$

В этом предположении для условной вероятности наблюдения состояния y_k при условии, что состояние x_{ij} уже реализовалось, справедливо равенство

$$p(y_k/x_{ij}) = p(y_k, x_{ij})/p(x_{ij}) = p(y_k)p(x_{ij})/p(x_{ij}) = p(y_k).$$

Любое взаимодействие между x_{ij} и y_k нарушает это равенство. В частности, когда $p(y_k/x_{ij}) > p(y_k)$, говорят, что информация передается от x_{ij} к y_k . Таким

образом, задача исследователя на первом этапе сводится к отысканию таких взаимодействующих пар y_k, x_{ij} и к оценке степени этого взаимодействия.

Для этого в теории информации вводятся так называемые энтропийные функции

$$H(Y) = -\sum_k p(y_k) \log_2(p(y_k)),$$

$$H(X_i) = -\sum_j p(x_{ij}) \log_2(p(x_{ij})),$$

$$H(Y/x_{ij}) = -\sum_k p(y_k/x_{ij}) \log_2(p(y_k/x_{ij})),$$

$$I(Y, x_{ij}) = H(Y) - H(Y/x_{ij}),$$

$$T(Y, X_i) = \sum_j p(x_{ij}) I(Y/x_{ij}).$$

Здесь $H(Y)$ – максимальная энтропия явления Y , $H(X_i)$ – максимальная энтропия действующего фактора i , $H(Y/x_{ij})$ – условная энтропия явления Y для некоторого фиксированного состояния x_{ij} . Физический смысл $I(Y, x_{ij})$ – это условная информация, которую можно получить о любом состоянии явления Y при некотором фиксированном состоянии фактора x_{ij} . Средняя информация, содержащаяся в такой системе, дается выражением $T(Y, X_i)$.

Легко видеть, что

$$T(Y, X_i) = H(Y) + H(X_i) - H(Y, X_i) = T(X_i, Y),$$

где $H(Y, X_i)$ определяются аналогично $H(Y)$ и $H(X_i)$. Эта формула говорит, что с теоретико-информационных позиций совершенно безразлично, передается информация от X_i к Y или наоборот. Это может быть важно при решении обратной задачи – предсказании значения действующего фактора по известному состоянию явления.

Операция по расчету величин $p(y_k)$, $p(y_k/x_{ij})$, $H(Y)$, $H(X_i)$, $H(Y, X_i)$, $T(Y, X_i)$ называется построением каналов связи [8]. Эффективность передачи информации от X_i к Y и от Y к X_i при этом определяется формулами

$$K(Y; X_i) = T(Y, X_i)/H(X_i), \quad K(X_i; Y) = T(X_i, Y)/H(Y).$$

Можно рассчитать таким образом все $2N$ коэффициентов $K(Y;X_i)$ (прямые информационные потоки) и $K(X_i;Y)$ (обратные информационные потоки) и ранжировать все действующие факторы по величине их влияния на результирующее явление и наоборот. Затем можно редуцировать количество действующих факторов, отбросив те из них, которые дают наименьшую информацию о системе.

Дальнейший многофакторный анализ, в котором учитывается взаимодействие двух, трех, четырех и т.д. действующих факторов, ведется уже только по наиболее информативным из них. Формулы для оценки степени взаимодействия факторов аналогичны приведенным выше, где в качестве аргумента стоят сочетания X_i, X_j , X_i, X_j, X_k и т.д.

Теория нечетких множеств, которая лежит в основе нечеткого моделирования, была разработана Лотфи А. Заде в 1965 году. Результаты его исследований были опубликованы в журнале “Information and Control” в статье “Fuzzy Sets”. Понятие “fuzzy” переводится, как “размытый, нечеткий”, и дистанцирует нечеткий подход от традиционной математики и аристотелевой логики [12–14].

Нечеткое множество представляет собой совокупность элементов произвольной природы, относительно которых нельзя с полной определенностью утверждать – принадлежит ли тот или иной элемент рассматриваемой совокупности данному множеству или нет. С точки зрения математики нечеткое множество A определяется как множество упорядоченных пар или кортежей вида: $\langle x, \mu_A(x) \rangle$, где x является элементом некоторого универсального множества или универсума X , а $\mu_A(x)$ – функция принадлежности, которая ставит в соответствие каждому из элементов $x \in X$ некоторое действительное число из интервала $[0, 1]$, т. е. данная функция определяется в форме отображения:

$$\mu_A: X \rightarrow [0, 1]$$

При этом значение $\mu_A(x)=1$ для некоторого $x \in X$ означает, что элемент x определенно принадлежит нечеткому множеству A , а значение $\mu_A(x)=0$

означает, что элемент x определенно не принадлежит нечеткому множеству A . В общем случае формально конечное нечеткое множество можно представить как $A = \{ \langle x, \mu_A(x) \rangle \}$.

На практике теория нечетких множеств нашла применение впервые в 1975 году когда Ассилиан и Мамдани построили нечеткий контролер для управления парагенератором. В 1982 году Остергад и Холмблад применили нечеткие модели при управлении процессом обжига цемента в печи на одном из заводов Дании. Успех применения нечеткого моделирования в промышленности вызвал интерес среди математиков и инженеров. Позже Бартоломей Коско доказал теорему о нечеткой аппроксимации. Согласно этой теореме любая математическая система может быть аппроксимирована системой, основанной на нечеткой логике [15].

Наибольшую популярность технологии, основанные на теории нечетких множеств, получили в Японии. В этой стране запатентовано более 3000 устройств в этой области – нечеткие логические видеокамеры, стиральные машины, содержащие микропроцессоры с нечеткими алгоритмами управления, “нечеткий” кондиционер, “нечеткая” противоскользкая тормозная система и т.д.

Методология нечеткого моделирования дополняет и конкретизирует системный подход при построении нечетких моделей сложных систем.

Под нечеткой моделью понимается информационно-логическая модель системы, построенная на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики. Одним из характерных признаков сложности построения модели оригинала является неопределенность в представлении структуры или поведении системы оригинала. Нечеткая система характеризуется неопределенностью типа нечеткости границы системы, некоторых ее состояний, входных и выходных воздействий.

В рамках современной методологии неопределенность может характеризовать следующие аспекты модельных представлений.

□ Неясность или нечеткость границы системы. Например, использование дихотомических признаков.

□ Неоднозначность семантики отдельных терминов, которые используются при построении концептуальных моделей систем.

□ Неполнота модельных представлений о некоторой сложной системе, особенно в связи с решением слабо формализуемых проблем.

□ Противоречивость отдельных компонентов модельных представлений или требований, которым должна удовлетворять модель сложной системы.

□ Неопределенность наступления тех или иных событий, относящихся к возможности нахождения системы оригинала в том или ином состоянии в будущем.

В отличие от традиционной математики, требующей моделирования точных и однозначных формулировок закономерностей, нечеткая логика предлагает совершенно иной уровень мышления, благодаря которому творческий процесс моделирования происходит на наивысшем уровне абстракции, при котором постулируется лишь минимальный набор закономерностей.

С позиции нечеткой логики истинность может рассматриваться также как лингвистическая переменная. В этом случае она может принимать значения “очень истинно”, “не очень истинно”, “не очень ложно” и т.д. Указанные лингвистические значения могут быть представлены в виде нечетких множеств [16, 17].

Лингвистическая переменная принимает значения из множества слов или словосочетаний некоторого естественного или искусственного языка. Лингвистическая переменная задается пятеркой (X, T, U, G, M) , где X – имя переменной; T – терм-множество, каждый элемент которого (терм) представляется как нечеткое множество на универсальном множестве U ; G – синтаксические правила, часто в виде грамматики, порождающие название

термов; M – семантические правила, задающие функции принадлежности нечетких термов, порожденных синтаксическими правилами G .

Если в качестве примера рассматривать лингвистическую переменную “температура в комнате” на универсальном множестве $U=[5;35]$, то функции принадлежности термов будут выглядеть следующим образом [16]:

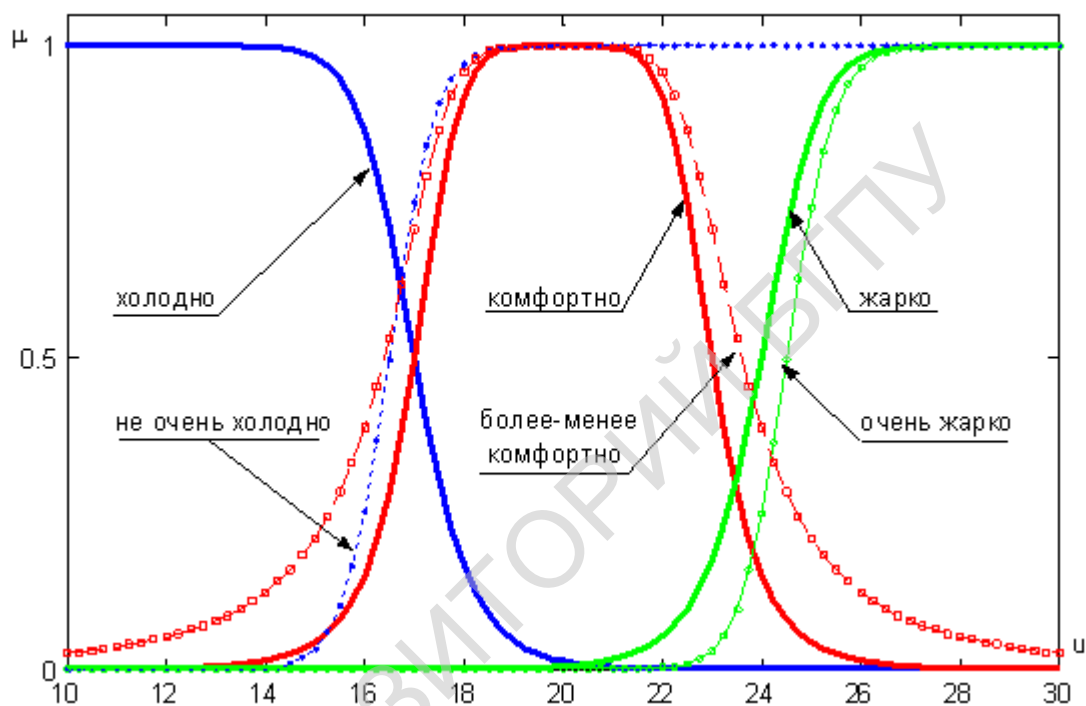


Рис. 5. Лингвистическая переменная “температура в комнате”.

Характерными чертами алгоритмов решения задач методами нечеткой логики является наличие некоторого набора утверждений (правил). Каждое состоит из совокупности событий (условий) и результатов (выводов).

После постановки задачи в терминах правил, состоящих из условий и выводов, производится их обработка по специальным алгоритмам. Идея обработки состоит в преобразовании (фаззификации) нечетких значений условий и выводов в количественную форму. Для этого используются различного рода функции принадлежности. Фаззификация нечетких значений может быть интерпретирована как переход в другое пространство.

В новом пространстве производится обработка нечетких переменных с использованием логических операций. Затем полученный результат логической обработки с использованием обратного преобразования (дефаззификации) переводится в исходное пространство числовых переменных [18, 19].

Отличительные преимущества fuzzy-систем по сравнению с прочими:

- возможность нечеткой формализации критериев оценки и сравнения: оперирование критериями «большинство», «возможно», «предпочтительно» и т.д. [20].

- возможность проведения качественных оценок как входных данных, так и выводимых результатов: можно оперировать не только собственно значениями данных, но и их степенью достоверности и ее распределением.

В сравнении с классическими математическими подходами теория нечетких множеств позволяет использовать неточные экологические данные и неопределенные знания эксперта их представлением в виде нечетких множеств или лингвистических значений, которые, в свою очередь, также могут быть представлены в виде нечетких множеств. Данные экологических исследований [21] или классы экологических объектов, описанные на основе методологии построения нечетких моделей, лучше отражают процессы, происходящие в окружающей среде.

Теория нечетких множеств используется, в основном, в прикладных разработках дисциплин медико-биологического профиля, а также в экологии [22–24]. По оценкам специалистов изучение методов построения нечетких моделей и их реализация занимают несколько недель [25], когда на разработку классических математических моделей требуется до нескольких лет.

В области охраны природы присутствуют обобщения, которые затрагивают вопросы социальной психологии, субъективного отношения человека к природе, которое может быть неопределенным в зависимости от различных причин, правила его поведения в той или иной ситуации. Рациональному природопользованию и правильной экологической политике

мешает уверенность человека в удаленности экологического события, невозможности определения в некоторых случаях допустимости риска и т.д. В 1970 году американский ученый Дж. М. Стайкс [2] сформулировал правило экономико-экологического восприятия, которое отражает четыре фазы восприятия экологических проблем человеком:

1. Ни разговоров, ни действий.
2. Разговоры, но бездействие.
3. Разговоры, начало действий.
4. Конец разговоров, решительное действие.

Это правило может быть графически представлено с помощью аппарата нечеткой логики. Рассматриваемую субъективную информацию можно описать, используя правила нечетких продукций следующего вида (система нечеткого вывода Мамдани):

ПРАВИЛО _ 1: ЕСЛИ разговоры отсутствуют И действия отсутствуют, ТО уровень проблемы низкий.

ПРАВИЛО _ 2: ЕСЛИ разговоры начинаются И действия отсутствуют, ТО уровень проблемы средний.

ПРАВИЛО _ 3: ЕСЛИ разговоры начинаются И действия начинаются, ТО уровень проблемы средний.

ПРАВИЛО _ 4: ЕСЛИ разговоры отсутствуют И действия решительны, ТО уровень проблемы высокий.

В качестве входных параметров системы нечеткого вывода будем рассматривать две нечеткие лингвистические переменные: “conversation” и “action”, а в качестве выходных параметров - нечеткую лингвистическую переменную “problem”.

В качестве терм-множества первой лингвистической переменной “conversation” будем использовать множество $T1 = \{“absence”, “beginning”, “presence”\}$.

В качестве терм-множества второй лингвистической переменной “action” будем использовать множество $T2 = \{“low”, “middle”, “high”\}$.

В качестве терм-множества выходной лингвистической переменной “problem” будем использовать множество $T_3 = \{“low”, “middle”, “high”\}$. Каждый из термов входных переменных будем оценивать по 10-балльной шкале.

Процесс нечеткого моделирования предполагает анализ результатов нечеткого вывода при различных значениях входных переменных с целью установления адекватности разработанной нечеткой модели.

Графический интерфейс позволяет оценить влияние изменения значений входных нечетких переменных на значение одной из выходных нечетких переменных (рис. 6).

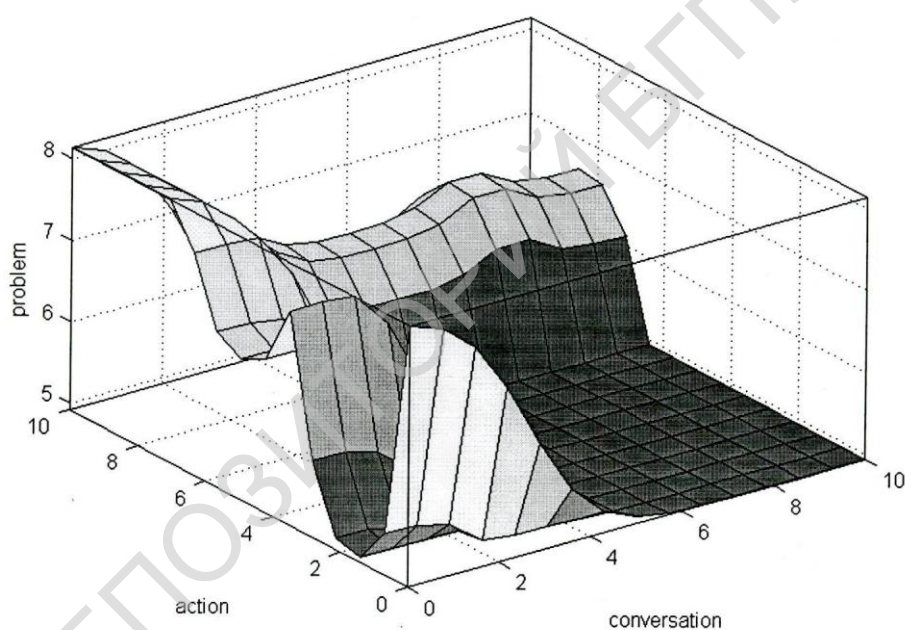


Рис. 6. Вид программы просмотра поверхности нечеткого вывода для разработанной нечеткой модели.

В различных экологических ситуациях всегда срабатывает принцип неопределенности или неполноты информации, смысл которого заключается в невозможности априорного суждения о возможных действиях по преобразованию окружающей среды. Это не позволяет использовать в полной мере при описании сложных экологических систем типовое моделирование природных процессов.

Литература

1. Гильманов, Т. Г. Теоретические основы математического моделирования экосистем: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.16 / Т. Г. Гильманов; Моск. гос. ун-т. – Москва, 1992. – 49 с.
2. Реймерс, Н. Ф. Экология (теория, законы, правила, принципы и гипотезы) / Н. Ф. Реймерс. – М.: Журнал «Россия Молодая», 1994 – 367 с.
3. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy ТЕСН / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ–Петербург, 2003. – 736 с.
4. Петросян, В. Г. Группа биоинформатики и моделирования биологических процессов / В. Г. Петросян // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа <http://www.sevin.ru/jubilee/pdfs/Petrosyan.pdf>. – дата доступа 30.03.2010.
5. Афанасьева, Т. Г. Теория и практика моделирования сложных систем / Т.Г. Афанасьева, Е.С. Голик, Д. А. Первухин. – СПб.: СЗТУ, 2005. – 131 с.
6. Parton, W. J. The CENTURY model / W. J. Parton // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.cgd.ucar.edu/vemap/abstracts/CENTURY.html>. – дата доступа: 30.03.2010.
7. Salski, A. Ecological Applications of Fuzzy Logic / A. Salski // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.springerlink.com/content/v453715262v815q6/>. – дата доступа: 30.09.2009.
8. Пузаченко, Ю.Г. Информационно–логический анализ в медико-географических исследованиях / Ю.Г. Пузаченко, А.В. Мошкин // Итоги науки: Медицинская география. – М.: Наука, 1969. – Вып. 3.– С. 5–74
9. Пузаченко, Ю.Г. Структура растительности лесной зоны СССР. Системный анализ / Ю.Г. Пузаченко, В.С. Скулкин. – М.: Наука, 1981. – 276 с.
10. Пузаченко, Ю.Г. Анализ пространственной структуры многовидовых сообществ животных / Ю.Г. Пузаченко, В.С. Скулкин, К.А. Роговин //

- Общие проблемы биогеоценологии: Мат. Всес. совещ. – М.: Наука, 1990.
– С. 55–100
11. Дромашко, С. Е. Очерки биоинформатики / С. Е. Дромашко. – Минск: Беларус. навука, 2009. – 400 с.
 12. Заде Л. А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / Л. А. Заде // [Электронный ресурс]. – 2010. Режим доступа: http://zadeh.narod.ru/zadeh_papers.html. – дата доступа: 01.03.2010.
 13. Заде Л. А. Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных интеллектуальных систем / Л. А. Заде // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.raai.org/library/library.shtml?ainews>. – дата доступа: 01.02.2010.
 14. Заде, Л. Тени нечетких множеств / Л. Заде // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: http://zadeh.narod.ru/zadeh_papers.html. – дата доступа: 09.03.2010.
 15. Штовба, С. Д., Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику / С. Д. Штовба // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>. – дата доступа 01.02.2010.
 16. Поспелов, Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления / Д. А. Поспелов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 232 с.
 17. Поспелов, Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. – М.: наука., 1986. – 288 с.
 18. Батыршин, И. З. Основные операции нечеткой логики / И. З. Батыршин // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.raai.org/library/library.shtml?ainews>. – дата доступа: 01.02.2010.
 19. Ротштейн, А. П. Интеллектуальные технологии идентификации / А. П. Ротштейн // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book5/index.php>. – дата доступа 01.02.2010.

20. Белман, Р., Заде, Л. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Белман, Л. Заде // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: http://zadeh.narod.ru/zadeh_papers.html. – дата доступа: 09.03.2010.
21. Логинов, В. Ф. Экологические угрозы и их последствия / В. Ф. Логинов // Экологический вестник. – 2007. – № 1. – С. 16–25.
22. Cornelissen, A. M. G. A novel approach to quantify agricultural sustainability using fuzzy set theory / A. M. G. Cornelissen // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.springerlink.com/content/q1t2204620745325/>. – дата доступа: 30.09.2009.
23. A fuzzy logic-classification of sediments based on data from in vitro biotests / S. Keiter [et al.] // J Soils Sediments. – 2009. – № 9. – P. 168–169.
24. A fuzzy logic model to describe the cyanobacteria *Nodularia spumigena* blooms in the Gulf of Finland, Baltic Sea / J. Laanemets [et al.] // Hydrobiologia. – 2006. – P. 31–45.
25. Батыршин, И. З. Общий взгляд на основные черты направления развития нечеткой логики Л. Заде / И. З. Батыршин // [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.raai.org/library/library.shtml?ainews>. – дата доступа: 01.02.2010.