Прогнозирование факторов, выводящих лесные экосистемы из равновесных состояний

Л.А. Володченкова, А.К. Гуц

Омский государственный университет, Россия, г.Омск

guts@omsu.ru

Равновесные экосистемы характеризуются тем, что их строение и состав колеблются около какой-то средней точки, представляющей как бы типичное состояние растительного покрова. К их числу относится большая часть фитоценозов. Динамика развития леса зависит от множества различных внешних управляющих факторов. Отдельные из этих факторов, изменяясь со временем, вполне способны вывести лесную экосистему из равновесия, начав при этом резкие, подчас катастрофические и неблагоприятные для населения, перемены в структуре и в организации фитоценоза.

Очевидно, что важно заранее выявить подобные факторы – назовем их факторами риска – и, кроме того, понять к каким последствием и новым равновесным состояниям лесной экосистемы приведут начавшиеся неконтролируемые изменения факторов риска.

Одним из методов решения данной задачи является математическое моделирование лесных экосистем. Поскольку мы интересуемся резкими, необратимыми переменами равновесных состояний экосистемы, то естественно использовать математическую теорию катастроф Рене Тома.

Мы взяли для исследования в качестве возможных факторов риска такие факторы как влажность w (можно этот фактор проинтерпретировать как освещенность), мозаичность (или оконная динамика) m (или качество атмосферного воздуха при иной интерпретации этого фактора), определяющая мозаичность фитоценоза; наличие конкуренции k (принцип конкурентного исключения) и антропогенное вмешательства v в лесную экосистему (вырубка леса, пожары и т.д.). Модель легко может быть усложнена за счет введения дополнительных управляющих внешних факторов, но при этом она становится менее наглядной и требует при ее использовании уже гораздо более серьезных математических знаний.

Состояние леса мы характеризуем скалярной функцией времени $x(t)$, зависящей от четырех управляющих внешних факторов, перечисленных выше. Функцию $x(t)$ будем называть *доброкачественностью леса*. Ее значения представляют собой интегральный показатель вида

$$x(t) = \sum_j f_j x_j(t),$$

где f_j – вес показателя $x_j(t)$, т.е. его вклад (доля) в интегральный показатель, а сами показатели $x_j(t)$ – это употребляемые при оценке лесных экосистем такие показатели как бонитет леса, показатели численности видов, индекс разнообразия видов, частота встречаемости, коэффициент встречаемости, обилие видов, покрытие, степень доминирования, биомасса, продуктивность древостоя, санитарное состояние леса, суховершинность, влажность древесины, возраст данного фитоценоза и другие.

Динамика доброкачественности леса описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial}{\partial x}(k_0 x^6 + kx^4 + mx^3 + ax^2 + wx). \qquad (1)$$

Отметим, что доброкачественность характеризуется неравенством $x > 0$; наличие конкуренции – неравенством $k < 0$, действенность оконной динамики –неравенством $m > 0$; вырубка лесов, пожары – неравенством $a < 0$, недостаток влаги –неравенством $w < 0$.

Первый член $k_0 x^6$ $(k_0 > 0)$ определяется наличием только четырех ярусов леса. Учет каждого нового яруса увеличивает показатель степени x на единицу. Но при этом теряется так называемая структурная устойчивость модели. Иначе говоря, вид уравнения не сохраняется при малых возмущениях правой части уравнения (1).

В правой части уравнения (1) $V(x,k,m,a,w) = k_0 x^6 + kx^4 + mx^3 + ax^2 + wx$ порождает при изменении факторов l,u,v,w самые различные бифуркации (катастрофы по Тому), называемые в математической теории катастроф катастрофами типа “бабочка”.

Модель описывает, например, следующие экологические катастрофы:

1. Катастрофы при вырубке лесов (при пожарах) в случае отсутствия мозаичности ($m = 0$), но при наличии сильной конкуренции ($k < 0$) и вне зависимости от влажности w. Ситуации изображены на рис.1, где равновесия – это минимумы (“ямки”) графика потенциальной функции экосистемы $V(x,k,m,a,w)$ как функции переменной x.

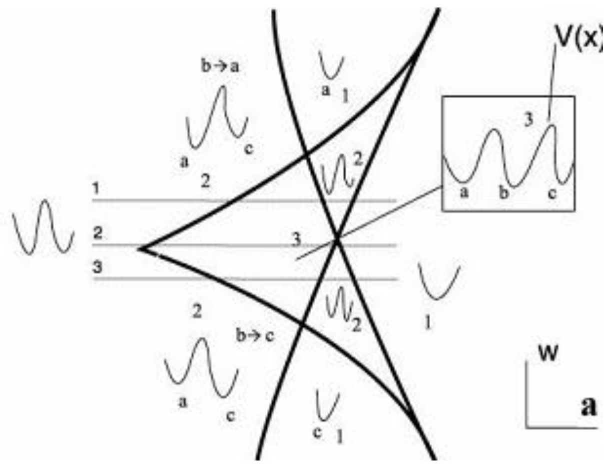

Рис.1.

Если фактор a уменьшается от значения $a > 0$ (поддержание леса в порядке) через $a = 0$ до $a < 0$ (идет вырубка лесов или имеет место пожар), то единственное устойчивое до этого равновесие лесной экосистемы сменяется одним из трех возможных; и в свою очередь, одно из них вскоре исчезает при дальнейшем уменьшении фактора a. Лесная экосистема наконец-то перейдет к новому равновесию, причем либо к одному из двух альтернативных, либо к одному конкретному в зависимости от степени влажности почвы.

2. Смены равновесия при засухах. Здесь возможны три случая. Ситуации изображены на рис.2, где равновесия – это “ямки” графика потенциальной функции экосистемы $V(x,k,m,a,w)$ как функции переменной x.

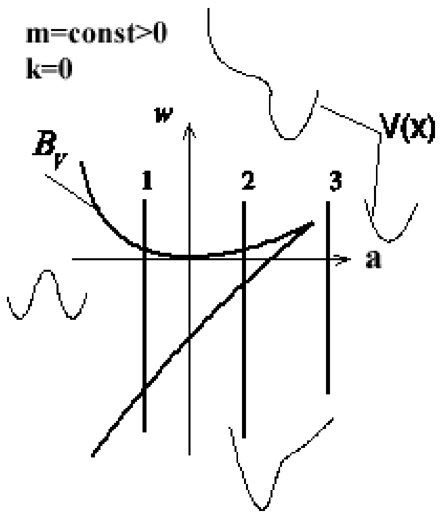

Рис.2.

Если $a = const < 0$ (пожары) и идет засуха (w уменьшается от 0 до очень маленького $w < 0$ вдоль линии 1), то два альтернативных равновесия сменяюся одним – лес после засухи и пожаров.

Если $a = const > 0$ (нет пожаров) и начинается и нарастает засуха (w уменьшается от $w > 0$ до очень маленького $w < 0$ вдоль линии 2), то одно равновесие заменяется на одно из двух альтернативных, а затем остается только одно – лес после засухи без пожаров.

Если $a = const > 0$ (нет пожаров) и начинается и нарастает засуха (w уменьшается от $w > 0$ до очень маленького $w < 0$ вдоль линии 3), то равновесие остается единственным, меняется только доброкачественность леса.

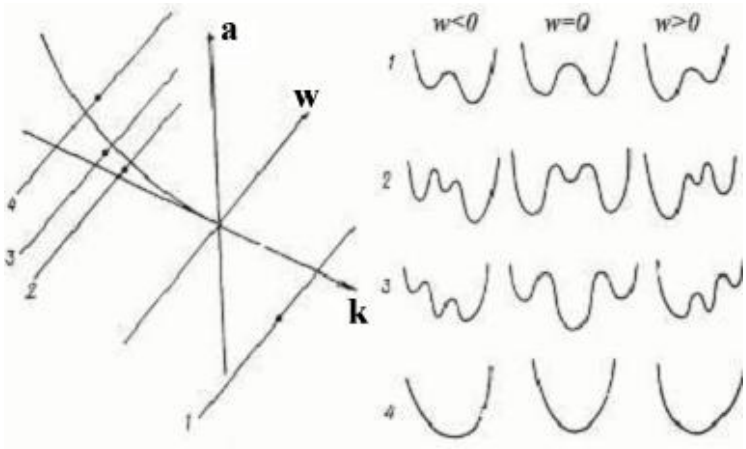

Рис.3.

3. Смена равновесия при вымокании леса (рис.3, изменения w вдоль линий 1,2,3,4). Полагаем, что имеет место случай $m = 0$, т.е. не наблюдается действие оконной динамики. Тогда при возрастании избытка влаги w в почве потенциальная функция экосистемы $V(x,k,m,a,w)$ как функция переменной x начинает меняться так, что при использовании нами так называемого правила Максвелла происходит смена равновесия и экосистема занимает состояние с меньшей доброкачественностью леса.