

Володченкова Л.А.

(Омский государственный университет, г.Омск)

Гуц А.К.

(Омский государственный университет, д.ф.-м.н., профессор, г.Омск)

Калиненко Н.А.

(Омский государственный педагогический университет, д.с.-х.н., профессор,

г.Омск)

## Мониторинг и прогнозирование деградации лесных экосистем

Прогнозирование грядущего экологического кризиса или деградации лесной экосистемы является важнейшей задачей в экологии. В данной статье предлагается возможное решение этой задачи, основанное на математической теории катастроф [1].

Математическая теория катастроф за четыре десятилетия своего развития нашла применение в самых разных сферах прикладной науки. Однако, хотя она и использовалась в экологии и в исследовании лесных экосистем, все известные модели базировались на самой простой катастрофе сборки, которая допускает только два внешних управляющих фактора. Этого мало для того, чтобы получить содержательные результаты применительно к лесным биоценозам. В работе впервые в экологии рассмотрена катастрофа «бабочка», что позволило описывать такие сложные катастрофические явления как вымокание леса, засуха и лесные пожары.

В качестве внешних факторов, оказывающих влияние на состояние лесного фитоценоза, нами взяты влажность почвы  $W$ , мозаичность леса  $m$ , наличие конкуренции деревьев  $k$  и антропогенное вмешательство  $a$ . Состояние лесной экосистемы характеризуем величиной продуктивности фитомассы  $x$  (можно, при желании, под  $x$  понимать индекс биоразнообразия Шеннона).

Теоретико-катастрофическая модель леса, учитывающая наличие вертикальной и горизонтальной структур лесной экосистемы, конкуренции, влажности почвы и различные антропогенные воздействия, имеет вид:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} V(x, k, m, a, w), \quad (1)$$

где

$$V(x, k, m, a, w) = \frac{\alpha}{6} (x - x_0)^6 + k(x - x_0)^4 + m(x - x_0)^3 + a(x - x_0)^2 + w(x - x_0),$$

$$k = -c_k (CI - CI_0), m = c_m \left( \frac{s^2}{\mu} - 1 \right), a = -c_a (YAH - YAH_0), w = c_w (W - W_0).$$

Здесь  $CI$  – индекс конкуренции Вайса [2];  $s^2 / \mu$  – коэффициент дисперсии,

являющийся показателем равномерности распределения деревьев в пространстве (если  $s^2 / \mu$  близко к нулю, то распределение регулярное, к единице – случайное, а чем более единицы, – тем контагиознее (пятнистее), т.е. мозаичнее);  $УАН$  – уровень антропогенной нагрузки на район, равный отношению степени антропогенного воздействия к биоклиматическому потенциалу, введенный в работе [3] (он позволяет учитывать все типы вредного воздействия на лесной биоценоз);  $W$  – влажность почвы;  $C_k, C_m, C_a, C_w$  – постоянные коэффициенты. Величины  $CI_0, УАН_0, W_0$  – это критические значения факторов, обозначающие границы экологической устойчивости фитоценоза (либо, в зависимости от решаемой задачи, их характерные значения).

Модель явным образом не предполагает, что возможны колебания теплового баланса на территории изучаемого региона. Но неявно температурный режим входит во внешний управляющий антропогенный фактор  $УАН$  [3].

Из уравнения (1) выводятся следующие так называемые бифуркационные соотношения, т.е. формулы для оценки и прогнозирования экологического кризиса и уровня деградации лесной экосистемы:

$$\begin{aligned} \omega &= \alpha x^5 + 4kx^3 + 3mx^2 + 2ax + w = 0 \\ \Omega &= 5\alpha x^4 + 12kx^2 + 6mx + 2a = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

На этих формулах основывается:

1) Методика мониторинга лесной экосистемы, направленная на прогнозирование экологических катастроф и уровня деградации лесных экосистем.

2) Методика оценки границ предельного антропогенного воздействия на фитоценоз.

1. Порядок проведения мониторинга лесной экосистемы предполагает выполнение следующих процедур:

– периодическое измерение для конкретной лесной экосистемы величин

$$\alpha, CI, s^2 / \mu, УАН, W, x;$$

– вычисление величин  $\omega, \Omega$ ;

– если каждый раз наблюдается уменьшение  $\omega$  и  $\Omega$ , т.е.  $\omega \rightarrow 0$  и  $\Omega \rightarrow 0$ , то это говорит о приближении экологического кризиса и об изменении уровня деградации лесной экосистемы.

2. Формулы (2) позволяют также оценить границы предельного антропогенного воздействия на фитоценоз. Делается это следующим образом:

– периодически определяется величина  $УАН$ ;

– найденное значение подставляется в формулы (2);

– если наблюдается уменьшение  $\omega$  и  $\Omega$ , то это говорит об усилении опасного антропогенного воздействия на лесную экосистему; катастрофа наступит, если  $\omega$  и  $\Omega$  поменяют знак на противоположный. Значение величины  $УАН$ , при котором это происходит и является предельно допустимым. (Величина  $УАН$  могла быть при этом задана первоначально с достаточным произволом).

3. Предложенные модель и методики предполагается использовать для решения ряда проблем, стоящих перед Главным управлением хозяйства Омской области.

Основными причинами гибели лесов в Омской области являются вымокание и пожары.

В Называевском районе Омской области с 1993 года процесс вымокания охватил 25 тыс. га.

Для березовых лесов Называевского лесхоза экспериментально найден потенциал, имеющий следующий вид:

$$V(x, k, t, a, w) = 210(x-12)^6 - 2835(x-12)^4 + 0,02(x-12)^2 + 2 \cdot 10^3 (W - W_0)(x-12).$$

Моделируем процесс вымокания леса, меняя влажность  $W$  от значения  $W_0 - 10\%$  до  $W_0 + 60\%$ . Результат компьютерных экспериментов, описывающих вымокание березовых лесов, представлен в виде графиков потенциала леса на рис.1-4. Черная жирная точка показывает устойчивые равновесные состояния леса. Ее перемещения – это изменения в состоянии леса. Наблюдается катастрофическое падение (рис.3) продуктивности фитоценоза по мере увеличения влажности почвы (от 15 т/га за год до 8,5 т/га за год).

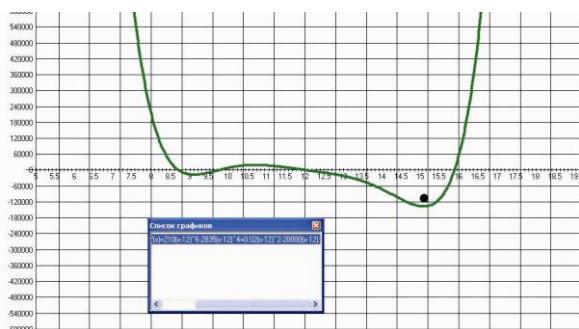


Рис.1. 1-я стадия вымокания. Практически здоровый лес. Лишь некоторые деревья имеют листву с признаками угнетения.  $W = W_0 - 10\%$ . Продукция  $x=15,0$ .

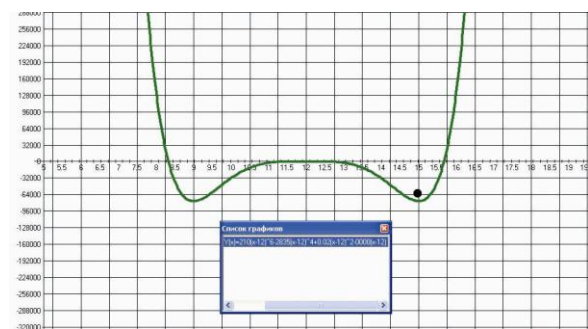


Рис.2. 2-я стадия вымокания. Частичное повреждение деревьев: половина из них имеют листву с признаками угнетения и сухие вершины. Кризис.  $W = W_0$ . Продукция  $x=15,0$ .

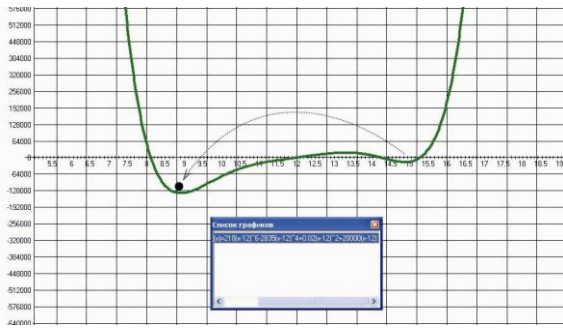


Рис.3. 3-я стадия вымокания. Деревья полностью лишены листьев. Имеются признаки разрушения древесины. Появляются признаки заболачивания.  $W = W_0 + 10\%$ . Продукция  $x=8,9$ . Наблюдаем экологическую катастрофу со скачкообразным ухудшением продуктивности леса.

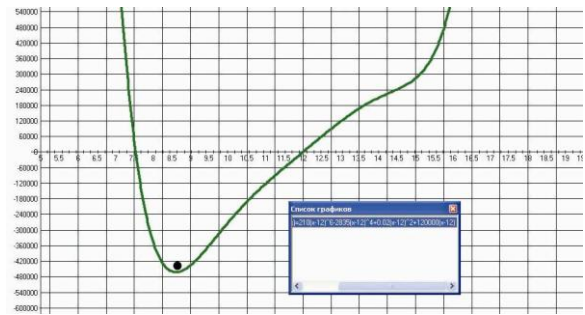


Рис.4. Начало 4-й стадии вымокания, 2-й уровень деградации. Начинается замена одной экосистемы на другую. Исчезает древесная растительность. На месте леса возникают заболоченные территории.  $W = W_0 + 60\%$ . Продукция  $x=8.5$ . Переход к 3-ему уровню деградации.

Найденный потенциал дает возможность проводить проверку устойчивости текущего состояния березового леса и прогнозировать его будущее состояние.

В самом деле,

– если жирная точка находилась на дне «ямки» (устойчивое равновесие), но рядом появляется другая, более глубокая (см. рис.1,2), то жди экологического кризиса или катастрофы (рис.3);

– если «кружок» (см. рис.5), т.е. лес в текущем состоянии и с продуктивностью  $x_{ТЕК}$  находится в «ямке», но не на дне (рис.5), то это неустойчивое состояние, которое не продлится долго; со временем «кружок» скатится на дно ямки. Это нормальная ситуации в динамике развития леса – переход к устойчивому состоянию;

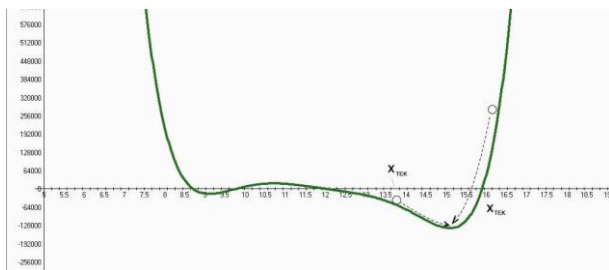


Рис.5. Переход к устойчивому равновесию  $x=15,0$  из неустойчивых в процессе эволюции леса  $W = W_0 - 10\%$ .

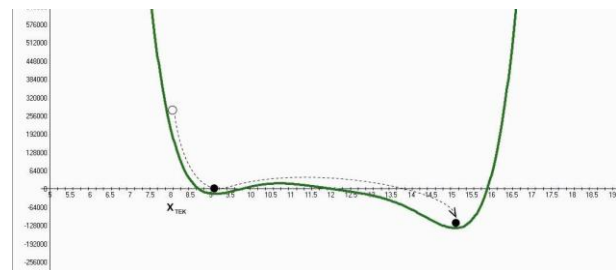


Рис.6. Переход к устойчивому равновесию  $x=15,0$  из «левых» неустойчивых в процессе эволюции леса  $W = W_0 - 10\%$ .

– если «кружок», т.е. лес в текущем состоянии и с продуктивностью  $x_{ТЕК}$  находится в левой, менее глубокой «ямке» (см. рис.6), то это неустойчивое состояние, которое не продлится долго; со временем «кружок» перекаатится в

силу правила Максвелла на дно правой более глубокой ямки. Это нормальная ситуация в динамике развития леса. Но в случае *правила максимального промедления* кружок скатится на дно левой, менее глубокой ямки.

Таким образом, зная вид потенциала березового леса, и уточняя константы для конкретных типов лесов, мы имеем возможность заранее посмотреть и спрогнозировать будущее состояние леса при изменении влажности леса и других внешних управляющих факторов.

4. Уменьшение биоразнообразия при вымокании леса. Известно, что и индекс разнообразия Шеннона  $H$  принимают максимальное значение при равенстве долей всех видов в сообществе, т.е. при максимальной выравненности. Если же доля какого-то одного вида (в случае доминирования) стремится к 1, а всех остальных – к нулю, то оба показателя также стремятся к нулю. С увеличением числа видов в сообществе максимальные значения обоих показателей, в особенности индекса  $H$ , увеличиваются.

При вымокании, сопровождающемся деградацией леса, биологическое разнообразие включает множество компонентов, не относящихся к древостою, которые могут начать доминировать под пологом леса. Поэтому в случае обнаружения тенденции индекса Шеннона, согласно существующей концепции биоразнообразия, следует заявить, что лесное сообщество становится менее разнообразным, в нем проявляется доминирование и, следовательно, становятся ниже разнообразие и выровненность.

Таким образом, процесс вымокания отражается в уменьшении индекса разнообразия Шеннона. Если бы мы выше интерпретировали доброкачественность леса  $X$  как индекс Шеннона (или Симпсона), то имели бы качественно картину катастрофы вымокания подобную той, что дана на рис.1-4, хотя для получения адекватной количественной картины потребовалась бы пересчитать коэффициенты  $c_k, c_{k_1}, c_m, c_a, c_w$ .

Важно, что наша модель способна одновременно правильно описывать уменьшение и продуктивности и биоразнообразия при катастрофе вымокания леса. Впрочем, это же можно сказать и о пожарах, и о засухе.

## Литература

1. Постон, Т. Теория катастроф и ее приложения [Текст] / Т. Постон, И.Стюарт. – М.: Мир, 1980.

2. Вайс, А.А. Влияние конкуренции на размеры деревьев в условиях средней Сибири [Электронный ресурс] / А.А. Вайс // VIII Международная научно-техническая конференция «Лесной комплекс: состояние и перспективы развития» 1 - 30 ноября 2007 г. – Брянск: изд-во БГИТА, 2008. – Режим доступа: [http://science-bsea.narod.ru/2007/leskomp\\_2007/vais\\_vl.htm](http://science-bsea.narod.ru/2007/leskomp_2007/vais_vl.htm)

3. Большаник, П.В. Эколого-ландшафтное районирование Омского Прииртышья [Текст] / П.В. Большаник, Н.О. Игенбаева // География природные ресурсы. – 2006. – №3. – С.37–41.

L.A. Volodchenkova, A.K. Guts, N.A. Kalinenko

## **Monitoring and prognosis of degradation of forest ecosystems**

The formulas with help of which it is possible to carry out monitoring and prognosis of ecological degradations of forest ecosystems are given

Даны формулы, с помощью которых можно проводить мониторинг и прогнозирование деградации лесных экосистем

Ключевые слова: лесная экосистема, мониторинг, прогнозирование, деградация, вымокание.

Key words: forest ecosystem, monitoring, prognosis, degradation, dampig off,