

УДК 630\*182.2 + 531.19+581.524.3

## **МОДЕЛЬ ВОССТАНОВИТЕЛЬНО-ВОЗРАСТНОЙ ДИНАМИКИ ЛЕСОВ ЗАУРАЛЬСКОЙ ХОЛМИСТО-ПРЕДГОРНОЙ ПРОВИНЦИИ**

**Иванова Н.С., Быстрой Г.П., Охотников С.А., Золотова Е.С.**

*Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Россия, e-mail: [i.n.s@bk.ru](mailto:i.n.s@bk.ru)*

*Уральский государственный университет им. А.М. Горького, Екатеринбург, Россия, e-mail: [sohotnikov@gmail.com](mailto:sohotnikov@gmail.com)*

*Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Россия, e-mail: [afalinakate@gmail.com](mailto:afalinakate@gmail.com)*

**Для Зауральской холмисто-предгорной провинции (Средний Урал) проведено изучение структуры лесной растительности. Построена нелинейная модель формирования структуры древесного яруса на сплошных вырубках. Выявлено удовлетворительное соответствие математической модели и эмпирических данных. Предложены объективные, количественные методы оценки устойчивости восстановительно-возрастного развития.**

Ключевые слова: сосновые леса, восстановительно-возрастная динамика, смена древесных видов, мощность почв, травяно-кустарничковый ярус, математическое моделирование, теория катастроф, прогнозирование.

## **MODEL OF FORESTS AGE-RESTORATION IN THE ZAURALSKY HILLY PIEDMONT PROVINCE**

**Ivanova N.S., Bystraj G. P. Ohotnikov S.A., Zolotova E.S.**

*Botanical Garden of Ural Branch RAS, Yekaterinburg, Russia, e-mail: [i.n.s@bk.ru](mailto:i.n.s@bk.ru)*

*Ural State University named after A. M. Gorky, Yekaterinburg, Russia, e-mail: [sohotnikov@gmail.com](mailto:sohotnikov@gmail.com)*

*Botanical Garden of Ural Branch RAS, Yekaterinburg, Russia, e-mail: [afalinakate@gmail.com](mailto:afalinakate@gmail.com)*

**For the Zauralsky hilly piedmont province (Middle Urals) of forest vegetation the structure was studied. The nonlinear model of tree layer structure forming is constructed on clearcutting. The satisfactory agreement between theory and experimental data were revealed. Objective quantitative methods of age-restoration development stability estimate are proposed.**

Key words: pine forests, soil power, forest restoration, change of tree species, mathematical modeling, catastrophe theory, prognosis.

Количественное прогнозирование восстановительно-возрастной динамики лесов – центральная проблема в рамках концепции устойчивого управления ресурсами. Сложность лесных экосистем, длительность, поливариантность и нелинейность протекающих в них динамических процессов является причиной отсутствия достоверных общепринятых методов анализа дигрессивно-демутационных смен. В связи с этим остро актуальна разработка теоретико-методологических и методических основ диагностики кризисных процессов и количественного прогнозирования динамики лесов. Особое значение приобретает математическое моделирование – мощный инструмент анализа поведения сложных самоорганизующихся систем. В предыдущих статьях нами (на примере формирования структуры

древесного яруса на сплошных вырубках в сосновых лесах Среднего Урала) приведена последовательность построения математической модели [1], рассмотрено влияние управляющих параметров (интенсивности развития травяно-кустарничкового яруса и лесорастительных условий (мощности почв)) на численность подроста сосны (*Pinus sylvestris* L.) и березы (*Betula pendula* Roth. и *B. pubescens* Ehrh.) на 4–5-летних вырубках [3]. В предлагаемой статье анализируется дальнейшая временная динамика лесной растительности и строится в рамках теории катастроф количественная математическая модель этого процесса.

### Методика исследований

Пробные площади (0.5 га) заложены в Зауральской холмисто-предгорной провинции между 57°00′–57°05′ с.ш. и 60°15′–60°25′ в.д. в двух вариантах дренированных экотопов: нижних частях пологих склонов с мощными (более 50 см) почвами, обеспечивающими устойчивое увлажнение (условно-коренной тип леса – сосняк разнотравный [5]) и на крутых склонах южной экспозиции с мелкими каменистыми почвами и крайне неустойчивым водным режимом (условно-коренной тип леса – сосняк брусничниковый [5]). Изучена восстановительно-возрастная динамика от сплошных вырубок (4–5-лет) до древостоев 50–55-летнего возраста. В нижних частях пологих склонов с мощными дренированными почвами формируются длительно-производные березняки разнотравно-вейниковые. На крутых склонах южной экспозиции с мелкими каменистыми почвами восстановление идет без смены эдификатора. Изучение древесной растительности на пробных площадях выполнено по общепринятым методикам [4]. В качестве интегральной характеристики фитоценотической роли растений использована фитомасса в абсолютно сухом состоянии. С целью определения продуктивности травяно-кустарничкового яруса закладывали в зависимости от мозаичности фитоценоза от 7 до 20 учетных площадок 1x1 м. Масса лесобразующих древесных видов определена расчетным путем. Масса стволов рассчитана по формуле:  $M_{ст} = gfh_{др}$ , где  $g$  – площадь сечения ствола на высоте груди (в молодняках – на половине высоты дерева);  $f$  – видовое число: для сосны  $f = 0.449 + (1.065/h)$ , для березы  $f = 0.397 + (1.029/h)$  [4];  $h$  – высота дерева;  $\rho_{др}$  – плотность древесины.

Масса кроны рассчитана на основе регрессионных уравнений, учитывающих физиологически обусловленные закономерности (пайп-модель). Для основных лесобразующих видов Урала уравнения получены В.А. Усольцевым [6]:

$$1) \text{ для сосны } - \quad \ln M_x = -4.846 + 2.1407 \ln D_{1,3}, \quad \ln M_{ск} = -5.2325 + 2.5419 \ln D_{1,3}$$

$$2) \text{ для березы } - \quad \ln M_{л} = -4.3637 + 1.8911 \ln D_{1,3}, \quad \ln M_{ск} = -4.4304 + 2.4645 \ln D_{1,3}$$

Для молодняков используется диаметр у основания кроны ( $D_{ок}$ ):

$$1) \text{ для сосны } - \quad \ln M_x = -3.8561 + 2,1660 \ln D_{ок}, \quad \ln M_{ск} = -3.9830 + 2.5356 \ln D_{ок}$$

$$2) \text{ для березы } - \quad \ln M_l = -4.0912 + 2.0650 \ln D_{ок}, \quad \ln M_{ск} = -4.0592 + 2.6826 \ln D_{ок}$$

где  $M_x, M_l$  – масса хвои и листьев в абсолютно-сухом состоянии (кг) соответственно;  $M_{ск}$  – масса скелета кроны в абсолютно-сухом состоянии (кг),  $D_{1,3}$  – диаметр дерева (см) на высоте 1.3 м,  $D_{ок}$  – диаметр у основания кроны.

Для описания динамики плотности (фитомассы) сосны и березы, их взаимовлияния в процессе формирования древостоя нами построены на основе систем связанных логистических уравнений модели их совместного существования. Использована следующая система дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx_1}{dt} = A_1 x_1 - B_1 x_1^2 + C_1 x_1 x_2$$

$$\frac{dx_2}{dt} = A_2 x_2 - B_2 x_2^2 + C_2 x_1 x_2$$

где  $x_1$  – плотность (надземная масса, г/м<sup>2</sup> в абсолютно сухом состоянии) сосны;  $x_2$  – плотность березы;  $A, B, C$  – параметры, которые определяются в процессе решения обратной задачи. Методика численного решения системы дифференциальных уравнений подробно изложена ранее [2]. Количественное описание формирования структуры древесного яруса на вырубках проводится в рамках теории катастроф на основе результатов, изложенных в предыдущих статьях [1, 3].

### Результаты и обсуждение

Характеристика лесорастительных условий, в пределах которых изучена восстановительно-возрастная динамика лесных экосистем, приведена в табл. 1. Характеристика растительности условно-коренных типов леса (на стадиях спелости) – в табл. 2. Несмотря на разницу в лесорастительных условиях, структура древесного яруса сходная. Подпологовая растительность и особенности возобновления древесных растений напротив – имеют существенные различия. В сосняках брусничниковых численность подроста сосны обыкновенной на порядок больше, чем в сосняках разнотравных. При абсолютной разновозрастности подроста сосны в сосняках брусничниковых преобладают младшие поколения (возраст 1–5 лет). В сосняках разнотравных подрост сосны представлен, как правило, отдельными поколениями с преобладанием старшего, послепожарного. По сравнению с сосняками брусничниковыми в сосняках разнотравных выше численность подроста березы (пушистой и бородавчатой), ели сибирской, отсутствует подрост лиственницы сибирской.

Таблица 1

Характеристика лесорастительных и почвенных условий, в пределах которых изучена восстановительно-возрастная динамика

Тип леса	Характеристика почв						
	Положение в рельефе, название почвы	Горизонт	Мощность, см.	Цвет	Состав	Сложение	Включения
С бр.	Вершины и верхние половины склонов возвышенностей. Горно-лесные примитивно-аккумулятивные	A <sub>0</sub>	0-5	мхи, слаборазложившийся опад (хвоя, листья)			
		A <sub>1</sub>	5-15	темно-серый	легкий суглинок	рыхлое	густо пропитан корнями
		BC	15-не более 40	светло-бурый	легкий суглинок с песком	рыхлое	корни, средние камни (30%), обломки породы
С ртр.	Ровные, слегка приподнятые участки водоразделов, пологие склоны. Дерново-слабоподзолистые на суглинистом элювии-делювии горных пород	A <sub>0</sub>	0-2	слаборазложившийся опад (хвоя, листья), ветви, кора			
		A <sub>1</sub>	2-10	темно-серый	супесь	рыхлое	густо пропитан корнями
		A <sub>2</sub> B	10-40	светло-бурый	средний суглинок с песком	плотное	мало корней, единичные камни
		B	40-80	темно-бурый	тяжелый суглинок	слитное	много мелких камней
		BC	80-90	серовато-бурый	супесь	рыхлое	много мелких камней

С целью определения положения объектов исследований в системе эколого-флористической классификации [7] проведен флористический анализ. Сосняки брусничниковые, произрастающие на крутых склонах южной экспозиции с мелкими каменистыми почвами, относятся к классу *Vaccinio-Piceetea Br.-Bl. in Br.-Bl., Siss. et Vlieger 1939* – бореальных темнохвойных и светлохвойных лесов (союз *Dicrano-Pinion (Libbert 1933) Matuszkiewicz 1962* – олиготрофные лишайниковые и ацидофильные моховые сосновые леса, формирующиеся на бедных минеральным азотом, кислых почвах (каменистых или песчаных)). Сосняки разнотравные (изученные длительно-производные березняки разнотравно-вейниковые) имеют признаки как класса *Vaccinio-Piceetea* (высокое постоянство *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, обязательное присутствие *Picea obovata*), так и класса *Brachypodio Pinnati-Betuletea* (гемибореальных светлохвойно-мелколиственных травяных мезофитных лесов Западной, Центральной Сибири и Урала) союза *Trollio europaea-Pinion sylvestris Fedorov ex Ermakov et al. 2000* (мезофитных сосново-березовых травяных лесов на плодородных и хорошо обеспеченных влагой почвах). Признаками этого класса является сомкнутый хорошо развитый разнотравный травяно-кустарничковый ярус, повышенное видовое богатство.

Таблица 2

Характеристика на стадиях спелости условно-коренных типов леса, в пределах которых изучена восстановительно-возрастная динамика

Показатель	Тип леса	
	Сосняк брусничниковый	Сосняк разнотравный
Древостой		
Состав	10С+Б, Л	10С+Б, Лп, Е
Бонитет	II–III	II–III
Запас, м <sup>3</sup> /га	Около 300	Около 300
Высота, м	23–25	27–30
Абсолютная полнота, м <sup>2</sup> /га	40–45	40–45
Численность подроста древесных растений, тыс. экз./га		
<i>Pinus sylvestris</i> L.	более 100	менее 10
<i>Betula pendula</i> Roth. и <i>B. pubescens</i> Ehrh.	0.1–0.2	0.3–0.5
<i>Larix sibirica</i> Ledeb.	менее 0.1	–
<i>Picea obovata</i> Ledeb.	до 0.5	0.5–1.0
Подлесок		
<i>Chamaecytisus ruthenicus</i> Klaskova	обильно	–
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	обильно	обильно
<i>Salix</i> L.	единично	единично
<i>Rosa acicularis</i> Lindl.	единично	разреженно
<i>Rubus idaeus</i> L.	единично	разреженно
<i>Tilia cordata</i> Mill.	–	единично
Травяно-кустарниковый ярус		
Проективное покрытие, %	20–40	80–100
Высота, см	20–30	40–50
Абсолютно-сухая масса, г/м <sup>2</sup>	70–100	110–130
Доминирующие виды	<i>Antennaria dioica</i> (L.) Gaertn., <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>Vaccinium myrtillus</i> L., <i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth., <i>Linnaea borealis</i> L.	<i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth., <i>Rubus saxatilis</i> L., <i>Solidago virgaurea</i> L., <i>Galium boreale</i> L., <i>Lathyrus vernus</i> (L.) Bernh., <i>Aegopodium podagraria</i> L.
Моховой ярус		
Проективное покрытие, %	1–10	1–10

Временная динамика формирования лесной растительности после сплошной рубки сосняка брусничникового изображена на рис. 1. Динамика рассматривается до 65-летнего возраста древостоя, начиная с 5-летних вырубков. Рисунок 1 наглядно показывает, что на всем изученном промежутке восстановительно-возрастных смен по массе явно преобладает сосна. Разница в плотностях изученных древесных видов составляет 1–2 порядка. Однако полного выпадения березы из структуры формирующихся лесов не наблюдается.

Временная динамика формирования лесной растительности после сплошной рубки сосняка разнотравного в нижних частях пологих склонов с мощными (более 50 см) дренированными почвами изображена на рис. 2. Динамика также рассматривается до 65-летнего возраста древостоя, начиная с 4-летних вырубков. В этих лесорастительных условиях наблюдается противоположное соотношение плотностей древесных видов: явно преобладает береза, сосна находится под ее угнетением. Формируются длительно-производные березняки разнотравно-вейниковые с сильно угнетенной сосной во втором ярусе.

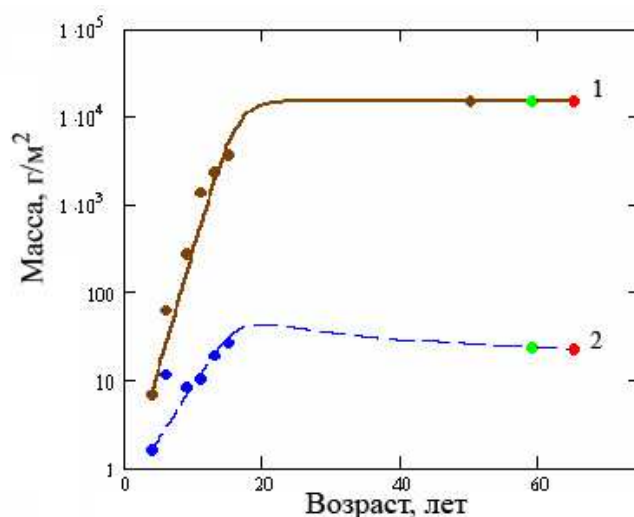


Рис.1. Восстановительно-возрастная динамика плотности (фитомассы) сосны и березы на крутых склонах южной экспозиции с мелкими каменистыми почвами (10–15 см): 1 – плотность сосны ( $\text{г/м}^2$ ), 2 – плотность березы ( $\text{г/м}^2$ ), точки – статистические данные, линии – результаты решения системы зависимых нелинейных логистических уравнений (две последние точки на них – прогноз вперед на 9 и 15 лет). Коэффициенты уравнений:  $A_1 = 0.625$ ;  $B_1 = 0.000043$ ;  $C_1 = 0$ ;  
 $A_2 = 0.292$ ;  $B_2 = 0.00113$ ;  $C_2 = -0.000019$

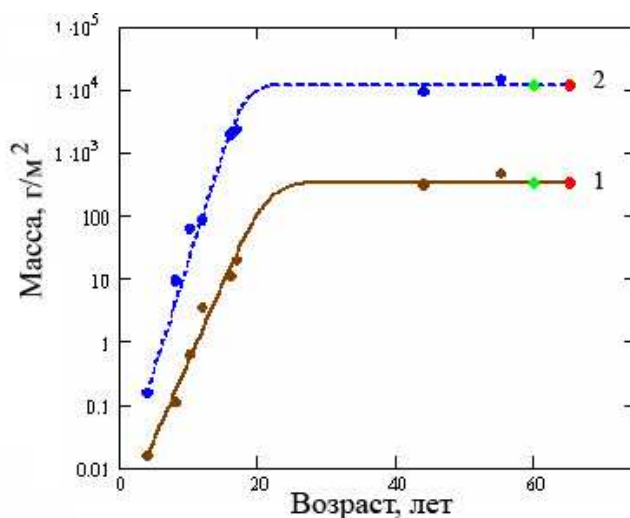


Рис. 2. Восстановительно-возрастная динамика плотности (фитомассы) сосны и березы в нижних частях пологих склонов с мощными (более 50 см) дренированными почвами: 1 – плотность сосны ( $\text{г/м}^2$ ), 2 – плотность березы ( $\text{г/м}^2$ ), точки – статистические данные, линии – результаты решения системы зависимых нелинейных логистических уравнений (две последние точки на них – прогноз вперед на 5 и 10 лет). Коэффициенты уравнений:  $A_1 = 0.575$ ;  $B_1 = 0.0017$ ;  $C_1 = 0$ ;  
 $A_2 = 0.805$ ;  $B_2 = 0.000069$ ;  $C_2 = 0$

Таким образом, нами дано математическое описание (на основе систем логистических уравнений) двух альтернативных экодинамических рядов формирования лесной растительности на сплошных вырубках: восстановление исходных лесов (после рубок в сосняках брусничниковых) и формирование длительно-производных березняков разнотрав-

но-вейниковых (после рубок в сосняках разнотравных). Опираясь на эти модели и на результаты, изложенные в предыдущих статьях [1, 3], построим следующую модель формирования древесного яруса на сплошных вырубках в зависимости от двух управляющих параметров: структура  $T$  (безразмерная характеристика равномерно распределенного травянистого яруса), объединяясь с двумя величинами  $\rho$  (характеристика, описывающая древесную растительность (сосна + береза)), приводит к образованию трех величин  $\rho$ . В тоже время величины  $\rho$  и  $T$  влияют на почвообразовательный процесс  $H$ . В свою очередь,  $H$  влияет на формирование древесного ( $\rho$ ) и травянистого яруса ( $T$ ). Данные процессы протекают как в прямом, так и в обратном направлениях. Это формализуется следующей схемой протекания процессов:

$$\begin{aligned} T + 2\rho &\leftrightarrow 3\rho(k_2, k_3) \\ \rho &\leftrightarrow H(k_1, k_4) \\ T &\leftrightarrow H. \end{aligned}$$

В скобках – константы скоростей прямых и обратных процессов. Из этого следует следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\rho}{dt} = -|k_1|\rho + |k_2|T\rho^2 - |k_3|\rho^3 + |k_4|H \quad (1)$$

где  $k_i$  – некоторые другие параметры экосистемы, которые следует определить.

Управляющий параметр  $H$  – характеристика богатства лесорастительных условий (мощность почвы, см).

Управляющий параметр  $T$  – безразмерная характеристика интенсивности развития травянистого яруса:  $T = (p_0 - p_m) / p_0$ ;  $p_m$  – масса трав, (чем больше масса трав, тем меньше  $T$ );  $p_0 = (p_s + p_b) / 2$  – среднее значение плотности сосны и березы;  $p_s$ ,  $p_b$  – плотность сосны и березы соответственно.

Предлагаемая модель описывает влияние лесорастительных условий на темпы роста древесных растений и угнетение формирующейся древесной растительности травянистым ярусом и. Чем меньше  $T$  (больше фитомасса трав), тем сильнее древесная растительность угнетается травами.

На основе полученных нами экспериментальных данных, решая обратную задачу, мы определили все параметры уравнения (1) (рис 3). Обратная задача решалась в программе *MathCAD 2001* методом последовательных приближений до достижения минимальности отклонения теоретической линии от экспериментальных точек по функционалу невязок. В результате получено два уравнения для восстановительно-возрастной динамики суммарной плотности сосны и березы (рис. 3а, б). На рассматриваемом временном ин-

тервале линии (результаты решения уравнений) достаточно хорошо соответствуют точкам (эмпирическим данным).

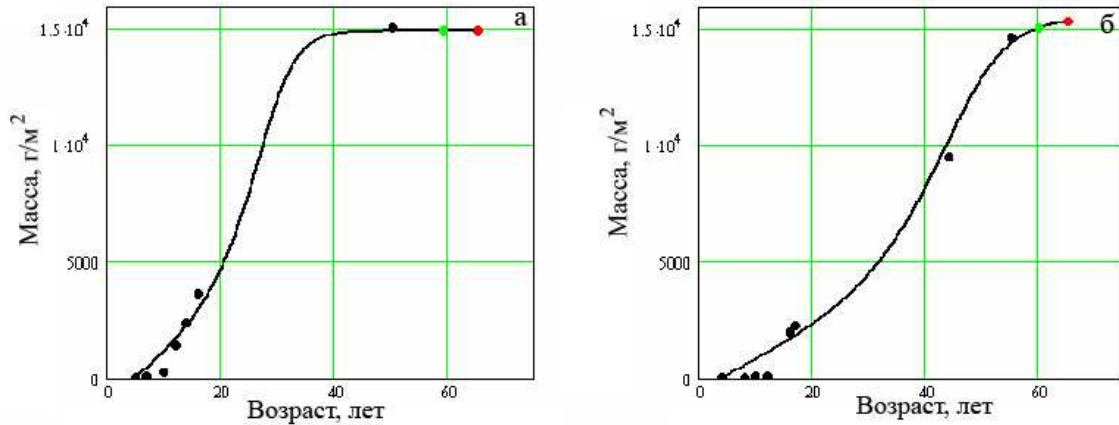


Рис. 3. Восстановительно-возрастная динамика суммарной плотности сосны и березы (точки – эмпирические данные, линии – результат решения уравнения (1)): а – сосняки брусничниковые на крутых склонах южной экспозиции с мелкими каменистыми почвами ( $H = 10\text{--}15$  см) (две последние точки на линии – прогноз на 9 и 15 лет); коэффициенты уравнения:  $k_1=2.22 \cdot 10^{-6}$ ,  $k_2T=2.06 \cdot 10^{-5}$ ,  $k_3=1.44 \cdot 10^{-9}$ ,  $k_4H=222.22$ ; б – березняки разнотравно-вейниковые в нижних частях пологих склонов с мощными ( $H$  более 50 см) дренированными почвами (две последние точки на линии – прогноз вперед на 5 и 10 лет); коэффициенты уравнения:  $k_1=0.013$ ,  $k_2T=1.36 \cdot 10^{-5}$ ,  $k_3=1.44 \cdot 10^{-10}$ ,  $k_4H=140$

От уравнения 1 можно перейти к уравнению 2 и далее к уравнению 3 [1]:

$$\frac{d\eta}{dt} = -(\eta^3 + a^* \eta + b^*), \text{ или } \frac{d\eta}{dt} = -\frac{\partial F^*}{\partial \eta}, \quad (2)$$

$$F^*(\eta, a^*, b^*) = \frac{1}{4}\eta^4 + \frac{1}{2}a^*\eta^2 + b^*\eta, \quad \eta = \rho^* - T\rho_0^*. \quad (3)$$

Здесь  $\eta = \rho/p_c - T\rho_0/p_c$  – параметр порядка, характеризующий отклонение плотности растительности (древесной и травянистой) при фиксированной величине  $T$ , близкой к единице, от некоторого среднего значения плотности сосны и березы  $\rho_0 = (\rho_s + \rho_b)/2$ ;  $\rho_0^* = |k_2|/3|k_3|\rho_c$ ;  $\rho_c$  – масштаб плотности;  $a^*$ ,  $b^*$  – параметры:  $a^* = -3(T^2\rho_0^* - 1)$ ,  $b^* = -H^* + 3T\rho_0^* - 2T^3\rho_0^{*3}$ . Параметр  $b^* = -H^* + H_s^*$  можно представить как сумму внешнего поля  $H^*$  и собственного самосогласованного  $H_s^* = 3T\rho_0^* - 2T^3\rho_0^{*3}$ .  $H^* = H/H_c$ ,  $H_c$  – критическая мощность почв. При  $b^* = 0$ ,  $H^* = H_s$ .  $F^* = F/F_0$  – потенциальная функция катастрофы сборки, которая определяет энергетическую характеристику в приведенном виде.

Восстановительно-возрастная динамика в приведенном (безразмерном виде) для изученных экодинамических рядов приведена на рис. 4. Определены параметры уравнения (3): для сосняков брусничниковых  $a^* = -1.3 \cdot 10^5$ ,  $b^* = 5.13 \cdot 10^6$ ; для березняков разнотравно-вейниковых  $a^* = -13.13$ ,  $b^* = 4.12$ . Различия в значениях параметров для сосняков брусничниковых и березняков разнотравно-вейниковых составляют 4 (для параметра  $a^*$ ) и 6 (для параметра  $b^*$ ) порядков.



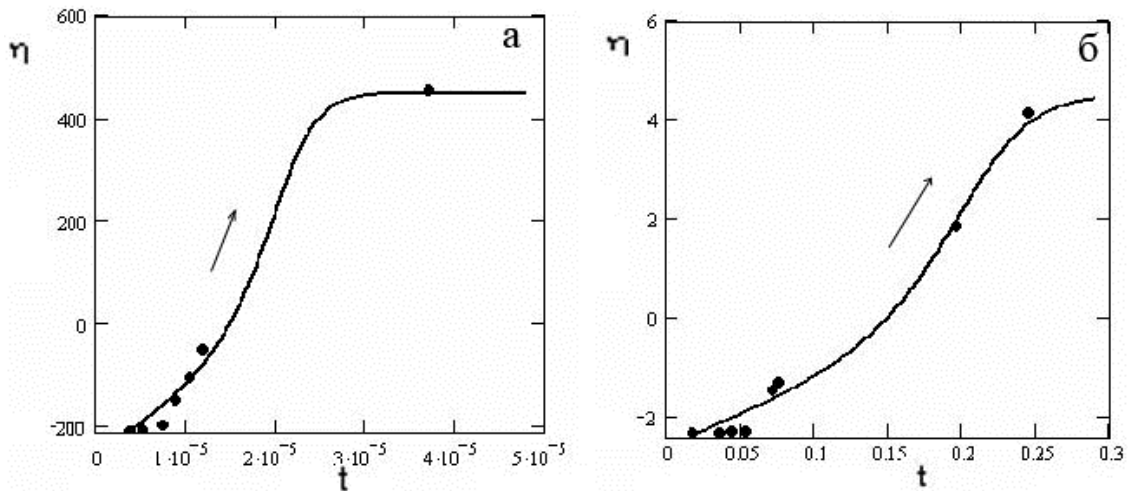


Рис. 4. Динамика параметра порядка, характеризующего отклонение плотности растительности (древесной и травянистой) при фиксированной величине  $T$  от среднего значения плотности сосны и березы (точки – эмпирические данные, линии – результат решения уравнения (3)): а – сосняки брусничниковые на крутых склонах южной экспозиции с мелкими каменистыми почвами; б – березняки разнотравно-вейниковые в нижних частях пологих склонов с мощными дренированными почвами

$F^* = F / F^0$  – потенциальная функция катастрофы сборки, которая определяет энергетическую характеристику в приведенном виде. Для изученных экодинамических рядов потенциальные функции приведены на рис. 5. По их виду определяется устойчивость состояния системы. Наличие локального или глобального минимума в общем случае определяется с помощью теоремы Тома, в случае катастрофы сборки – ненулевыми значениями управляющего параметра  $b^*$  (при  $b^*=0$  потенциал симметричный). Для 2-х рассмотренных нами частных ситуаций  $b^*$  отличен от 0: для сосняков брусничниковых  $b^*=5.13 \cdot 10^6$ ; для березняков разнотравно-вейниковых  $b^*=4,12$ . Разница между рассматриваемыми сосняками и березняками по параметру  $b^*$  составляет 6 порядков.

Рисунки 5 наглядно показывают, что в процессе формирования лесной растительности на сплошных вырубках происходит формирование нового устойчивого состояния: сосняков брусничниковых (рис.5а) и березняков разнотравно-вейниковых (рис. 5б).

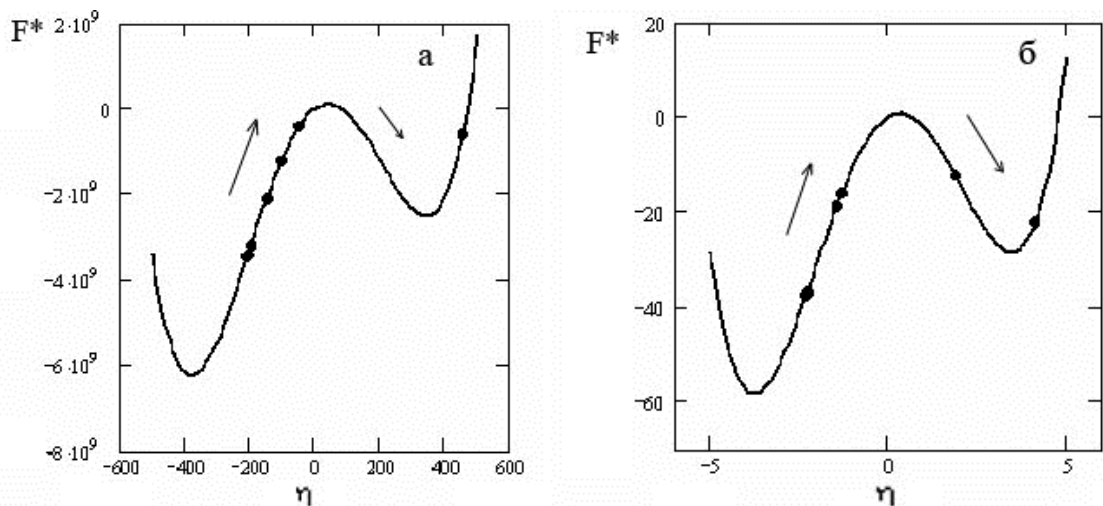


Рис. 5. Потенциальные функции (точки – эмпирические данные, линии – результат решения уравнения (4)): а – сосняки брусничниковые на крутых склонах южной экспозиции с мелкими каменистыми почвами; б – березняки разнотравно-вейниковые в нижних частях пологих склонов с мощными дренированными почвами

Об устойчивости формирования структуры древесного яруса (соснового или березового) можно судить по удаленности системы от сепаратрисы. Сепаратриса уравнения формирующейся на вырубке лесной растительности  $(a^*/3)^3 + (b^*/2)^2 = 0$  является предельной для метастабильных состояний древесного и травянистого ярусов. Для изученных нами сосняков брусничниковых  $(a^*/3)^3 + (b^*/2)^2 = -7.79 \cdot 10^{13}$ , для березняков разнотравных  $(a^*/3)^3 + (b^*/2)^2 = -79.59$ . Эти значения показывают достаточную удаленность от сепаратрисы и сосняков брусничниковых, и березняков разнотравно-вейниковых. Это свидетельствует о том, что смена эдификатора маловероятна. Чем больше удаленность от сепаратрисы, тем большие внешние воздействия необходимы для изменения структуры древесного яруса. В нижних частях пологих склонов с мощными дренированными почвами происходит нежелательная смена условно-коренных сосняков разнотравных на длительно-производные березняки разнотравно-вейниковые, в которых восстановление преобладания сосны естественным путем затруднено.

Предлагаемый нами подход позволяет рассчитать восприимчивость для уравнения  $\eta^3 + a^* \eta + H_s^* = H^*$  (характеристику изменения переменной  $\eta$  при изменении внешнего поля  $H^*$ ):

$$\chi = \frac{\partial \eta}{\partial H^*} = \frac{1}{3\eta^2 + a^*} = -\frac{1}{2a^*} = \frac{1}{6(T^2 \rho_0^{*2} - 1)}.$$

При приближении к критической точке  $a^* = b^* = \eta \rightarrow 0$ , а восприимчивость стремится к бесконечности. Для рассматриваемых нами сосняков брусничниковых восприимчивость составляет 0.0000038, для березняков разнотравно-вейниковых – 0.038. Малая

восприимчивость и достаточная удаленность от сепаратрисы березняков разнотравно-вейниковых свидетельствует о недостаточности одноразовых (таких как минерализация почвы) мер по содействию естественному возобновлению древесных растений для формирования в нижних частях пологих склонов с мощными дренированными почвами сосновых молодняков.

Таким образом, в рамках нелинейной динамики математически формализовано существование в пределах одного экотопа альтернативных линий сукцессионной динамики (сосняков и березняков). Результаты представлены в наглядной форме: в виде графиков потенциальных функций. Разработаны объективные, количественные методы оценки устойчивости восстановительно-возрастной динамики, обеспечивающие обоснованное прогнозирование состояния описываемых объектов. В качестве основных критериев устойчивости развития предлагаются: удаленность от сепаратрисы и величина восприимчивости.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы Президиума РАН «Биологическое разнообразие» (проект 09-П-4-1039), Целевой программы УрО РАН поддержки междисциплинарных проектов, выполняемых в содружестве с учеными СО и ДВО РАН в рамках интеграционного проекта 09-С-6-1001 «Диагностика состояния, моделирование тенденций и прогноз развития регионов России на период до 2030 г.», РФФИ (проект «Социально-экономические риски в саморазвитии регионов России: диагностика кризисных процессов и разработка механизмов минимизации рисков» № 10-06-00042а).

### Литература

1. Быстрая Г.П., Иванова Н.С. Подходы к моделированию динамики лесной растительности на основе теории катастроф // Аграрный вестник Урала. 2010. № 2. С. 75–79
2. Иванова Н.С. Исследование сопряженности восстановительно-возрастной динамики древостоя и подчиненных ярусов в коротко-производных березняках западных низкогорий Южного Урала // Аграрный вестник Урала. 2009. № 1. С. 76–79.
3. Иванова Н.С., Быстрая Г.П. Модель формирования структуры древесного яруса на вырубках. Часть 1. Управляющие параметры // Аграрный вестник Урала, 2010. №5. С. 85–89.
4. Изюмский П.П. Таксация тонкомерного леса. М.: Лесная пром-сть, 1972. 88 с.
5. Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1974. 176 с.
6. Усольцев В.А. Биоэкологические аспекты таксации фитомассы деревьев. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 216 с.

7. Braun-Blanquet J Pflanzensociologie. Grundzuge der Vegetationskunde. 3 Aufl. Wien-New York: Springer-Verlag, 1964. 865 s.

**Рецензенты:**

Мартыненко В.Б., д.б.н., зав. лабораторией геоботаники и охраны растительности ИБ УНЦ РАН, г. Уфа.

Шиятов С.Г., д.б.н., профессор, ведущий научный сотрудник Института Экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург.

**Работа получена 08.09.2011.**