Сибирский экологический журнал, 3 (2014) 345–353

УДК 630*+630.52

Принцип универсальности при использовании моделей фазовых переходов второго рода для описания сукцессионных процессов в лесу

А. С. ИСАЕВ[1], Т. М. ОВЧИННИКОВА[2], С. Д. БАБОЙ[2], В. Г. СУХОВОЛЬСКИЙ[2]

[1] *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН*
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

[2] *Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН*
660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 28
E-mail: soukhovolsky@yandex.ru

Статья поступила 8.10.2013

АННОТАЦИЯ

Для описания сукцессионных процессов в лесных ценозах и пространственного распределения древесных пород на территории предложен подход, связанный с использованием моделей фазовых переходов второго рода. Введены переменные и уравнение моделей фазового перехода, описывающие процессы в лесных ценозах. Проведенный анализ показал, что модель, основанная на представлении процессов в лесу как фазовых переходов второго рода, хорошо согласуется с натурными данными. Параметры модели могут быть вычислены по данным натурных наблюдений и использованы для прогнозных расчетов сукцессионных процессов в лесу и высотно-поясной зональности лесных ценозов в горных условиях. Предлагаемый подход к моделированию динамических процессов в лесу как фазовых переходов второго рода носит универсальный характер, что существенно упрощает задачу построения моделей лесной динамики.

Ключевые слова: лесные ценозы, породный состав, сукцессии, высотные пояса, моделирование, фазовые переходы.

Лесные ценозы за время своего существования претерпевают разнообразные качественные изменения, связанные со сменой пород в насаждении, изменениями возрастной и пространственной структуры насаждений. Периоды, в течение которых происходят эти изменения, составляют десятки и сотни лет, что сильно затрудняет наблюдения за индивидуальными экологическими объектами. В этой ситуации для эффективного анализа и прогнозирования медленно протекающих сукцессионных процессов используются методы математического моделирования. Для моделирования как естественных сукцессий, так и изменения растительного покрова, вызванного катастрофическими воздействиями, используются регрессионные модели [Perry, Millington, 2008]. Для построения таких моделей используются сведения об основных компонентах природных экосистем (геоботанические, почвенные, лесотаксационные и др.), базы данных о факторах внешней среды (топографические, климатические, геологические и др.), данные о природно-территориальных комплексах, материалы космо- и аэросъемки, режимы возможных природных и антропогенных нарушений [Рыжкова и др., 2004; Carmel et al., 2001; Guisan, Zimmermann, 2000]. Однако такие модели не обладают должной общностью, неустойчивы к смене объекта моделирования, и не позволяют анализировать базовые закономерности сукцессионных процессов.

В качестве метода общего описания хода сукцессии часто используются марковские цепи. В этих моделях дискретное множество состояний цепи отождествляется с множеством этапов сукцессии, а матрица переходов характеризует вероятности смены состояний ценоза. Такие модели сукцессионных процессов позволяют рассчитывать площади ценозов, находящихся на различных стадиях сукцессии, и давать оценки времени достижения определенных состояний ценоза [Логофет, 2010].

Широкое распространение для кратко- и среднесрочного прогнозирования динамики конкретных экосистем на небольших территориях (1–1000 га) получили имитационные гэп-модели, в которых в качестве единицы моделирования рассматривается участок фиксированной площадью – гэп, и описывается коллективная динамика деревьев в пределах такого гэпа, а также более детализованных индивидуум-ориентированных моделей (IBM-моделей), в которых в качестве единицы моделирования рассматривается уже не гэп, а отдельное дерево в насаждении, начальные координаты которого фиксированы в пространстве [Komarov et al., 2003; Shugart, 1998]. Такие модели используются для описания эффектов разрушительных воздействий на структуру и состав лесов [Miller, Urban, 1999; Lafon, 2004], климатических изменений [He et al., 1999] и естественных сукцессий в различных лесных экосистемах [Shugart, 1998]. Предполагается, что на рост отдельного дерева влияют как факторы среды, так и взаимодействия с другими деревьями в насаждении. Однако и в гэп-, и в IBM-моделях в процессе моделирования велика доля произвольно выбранных условий. Фактически IBM-модели есть марковские модели для отдельного дерева с переменной матрицей переходов. Выбор же правил, по которым изменяется матрица переходов, в рамках IBM-модели не фиксируется. И можно согласиться с тем, что “построить модель, в которой сукцессия происходит, а не назначается... по каким-либо правилам замены одного типа леса на другой, пока не удается” [Комаров, 2009].

Представляется, что для описания сукцессионных процессов необходимы новые подходы к моделированию сложных экологических систем, позволяющие, с одной стороны, рассматривать малоразмерные модели, а с другой стороны, описать качественные изменения в экосистемах. В настоящей работе применяется подход к моделированию сукцессий, согласно которому сукцессионные процессы рассматриваются как аналоги фазовых переходов второго рода в физических системах [Исаев и др., 2009, 2012; Li, 2002].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объекты исследований. Для анализа сукцессионных процессов в лесных ценозах использовались данные о ходе формирования елово-лиственных насаждений в Литве [Кайрюкштис, 1969] и данные о высотной зональности лесной растительности среднегорных барьерно-дождевых ландшафтов Западного Саяна [Исмаилова и др., 2011; Поликарпов и др., 1986].

Для елово-лиственных насаждений в Литве использовались данные по составу, густоте, полноте, сомкнутости крон при систематических, повторяемых через 3–5 лет, обмера деревьев на более чем 300 постоянных пробных площадях в пяти типах леса: черничных осинниках с елью, чернично-кисличных осинниках с елью, снытьевых осинниках с елью, чернично-кисличных березняках с елью, чернично-кисличных елово-осиновых.

На высотном профиле модельной территории Западного Саяна в границах Танзыбейского лесничества были выбраны три трансекты длиной около 45 км и средней шириной 3 км каждая с минимальной высотой H_0 = 320 м над ур. м. и максимальной высотой 1700 м над ур. м. На трансектах использовались данные о составе насаждения, площади и высоты над ур. м. для всех выделов, попавших в пределы трансекты. Трансекта 1 содержит 858 выделов, трансекта 2 – 506 выделов, трансекта 3 – 467 выделов общей площадью 7908, 9799 и 8589 га соответственно. Для выделенных трансект с шагом 47,6 м по высоте оценивались площади и породный состав лесных насаждений в заданном диапазоне высот. Для удобства дальнейших расчетов сдвигали точку начала отсчета высоты и далее, наряду с абсолютной высотой H произрастания насаждения (м над ур. м.), использовали высоту $h = H - H_0$ (м). Каждый выдел в пределах изученных трансект характеризовался площадью и породным составом, включавшим березу *Betula pendula* Roth., осину *Populis tremula* L., пихту сибирскую *Abies sibirica* Ledeb, кедр сибирский (кедровую сосну) *Pinus sibirica* Du Tour, сосну обыкновенную *Pinus sylvestris* L.

Методика моделирования. Сукцессионный процесс можно рассматривать как своеобразный фазовый переход, в ходе которого фазы – ценозы различного типа – сменяют друг друга. Для описания экологических фазовых переходов введем функцию $G(x_1, x_2,...)$ риска трансформации ценоза, находящегося в определенной стадии сукцессии. Будем предполагать, что для устойчивой фазы сукцессии функция G риска достигает своего минимально возможного значения:

$$G(x_1,x_2,...) \Rightarrow \min. \qquad (1)$$

Факт наличия сукцессионных переходов с точки зрения такого подхода означает, что у функции G имеется несколько локальных минимумов, и отдельный фазовый (сукцессионный) переход представляет собой изменение состояния системы под влиянием некоторых факторов и переход из состояния, характеризуемого некоторым локальным минимумом значения G, в состояние, характеризуемое другим локальным минимумом значения G, когда в насаждении изменяется породная структура и возрастной спектр деревьев.

Можно предположить, что функция $G(x_1, x_2,...)$ зависит от большого числа различных модифицирующих и регулирующих факторов, и фазовый переход происходит, когда интенсивность воздействия одного или нескольких факторов превышает определенный порог. Однако найти все минимумы функции G (соответствующие всем возможным сукцессионным состояниям ценоза) вряд ли возможно, так как вид $G(x_1, x_2,...)$ и ее зависимость от различных внешних факторов в общем случае неизвестны.

Для построения упрощенной модели сукцессионных переходов будем предполагать, что G можно представить как функцию $G(q)$ от некоторой величины – параметра порядка q, характеризующей породный состав насаждений. Параметр порядка вводится так, чтобы $0 \le q \le 1$. Далее, разложив функцию $G(q)$ в ряд Тейлора по четным степеням параметра порядка q, запишем аналог уравнения Ландау для фазовых переходов в физических системах [Ландау, 1938; Ландау, Лифшиц, 1964]:

$$G = G_0 + Aq^2 + bq^4 + \Rightarrow \min, \qquad (2)$$

где $G_0 > 0$, A и $b > 0$ – параметры.

Так как параметр порядка q не превосходит 1, то члены со степенями q, большими 4, в разложении (2) будут малы, и поэтому можно ограничиться первыми тремя членами в разложении.

Экологические фазовые переходы, так же как и фазовые переходы в физических системах, происходят под воздействием некоторой внешней управляющей переменной X. Качественные изменения в системе начинаются, когда управляющая переменная достигнет критического значения X_r. Предполагается, что в (2) параметр A является функцией, линейно зависящей от управляющей переменной X [Ландау, Лифшиц, 1964]:

$$A = a(X - X_r), \qquad (3)$$

где $a > 0$.

Тогда

$$G = G_0 + a(X - X_r)q^2 + bq^4 \Rightarrow \min. \qquad (4)$$

Условие минимума функции G находится стандартным образом:

$$\frac{\partial G}{\partial q} = 0; \ \frac{\partial^2 G}{\partial q^2} > 0, \qquad (5)$$

$$\frac{\partial G}{\partial q} = 2a\left(X - X_r\right)q + 4bq^3 = 0. \qquad (6)$$

Уравнение (6) имеет два решения:

$$q^2 = \begin{cases} 0, & X > X_r \\ \frac{a}{2b}\left(X_r - X\right), & X < X_r. \end{cases} \qquad (7)$$

Как видно из (7), если значение управляющей переменной X больше критического значения X_r, то параметр порядка $q = 0$. Если X меньше критического значения X_r, то, согласно (7), имеет место отрицательная линейная связь между квадратом параметра

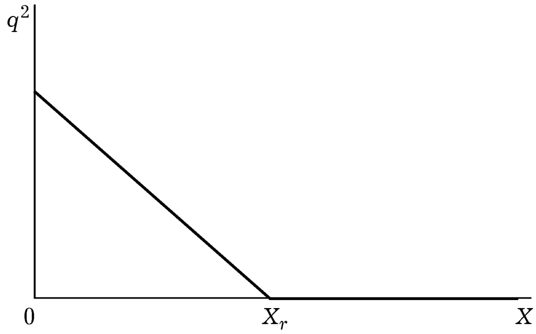

Рис. 1. Графический вид уравнения (7)

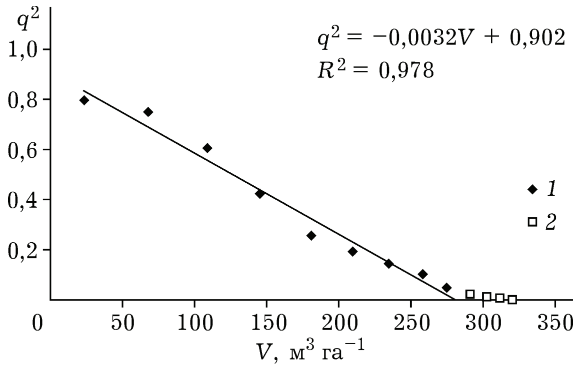

Рис. 2. Сукцессионный процесс в чернично-кисличных березняках (*1*), заменяемых на еловые насаждения (*2*)

порядка и значением управляющей переменной. Таким образом, модель (4) описывает систему с двумя возможными состояниями (фазами) и фазовый переход из одного состояния в другое реализуется при изменении величины управляющей переменной.

На рис. 1 приведен графический вид уравнения (7). Как видно, при значениях управляющей переменной, больших критической величины X_r, параметр порядка $q = 0$, а при $X < X_r$ зависимость между квадратом параметра порядка и значением управляющей переменной линейна. Если из результатов наблюдений известно некоторое число m пар значений $\{X(j)q_j^2\}$ ($j = 1,...,m$), то, используя эти данные, можно построить регрессионное уравнение, описывающее связь между q^2 и X:

$$q^2 = \alpha - \beta X. \qquad (8)$$

Зная коэффициенты уравнения (8), можно получить оценку критического значения $X_r = \dfrac{\alpha}{\beta}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера использования предлагаемого подхода для описания сукцессионных переходов рассмотрим модель смены пород в насаждении, когда лиственные деревья верхнего яруса заменяются деревьями хвойных пород из нижнего яруса. Для расчетов использованы данные, приведенные в работе [Кайрюкштис, 1969]. В модели смены пород определим параметр порядка как отношение числа деревьев лиственных пород во втором ярусе на пробной площади к общему числу деревьев во втором ярусе, а в качестве управляющей переменной будем рассматривать запас V (м^{3}га$^{-1}$) стволовой древесины в верхнем ярусе.

На рис. 2 отражена связь величин квадрата параметра порядка второго яруса с запасом V древесины деревьев верхнего яруса для натурных данных, характеризующих сукцессионный процесс в чернично-кисличных березняках, замещаемых ельниками [Кайрюкштис, 1969]. Как видно из рис. 2, зависимость величины q^2 нижнего яруса насаждения от запаса V верхнего яруса, вычисленная по натурным данным, хорошо согласуется с моделью (4). График зависимости квадрата параметра порядка от величины управляющей переменной V аналогичен модельному графику на рис. 1. Для использованных натурных данных критический запас V_r древесины верхнего яруса, характеризующий точку пересечения прямой $q^2 = \alpha - \beta V$ с осью абсцисс, составил 300 м$^3 \cdot$ га$^{-1}$.

С помощью модели фазовых переходов второго рода можно описать влияние модифицирующих факторов на породный состав лесных ценозов. Рассмотрим модель высотной зональности насаждений в Саянах. В качестве параметров порядка для модели высотно-поясной зональности k-ой породы выбрали долю $q(k, h)$ деревьев этой породы в составе насаждений на высоте h, а в качестве управляющей переменной – высота h или модуль разности между текущим значением h высоты и значением h_{opt} высоты, на которой доля деревьев k-ой породы максимальна.

Для пихты сибирской *A. sibirica* высотно-поясная зональность очень хорошо описывается моделью фазового перехода с одним па-

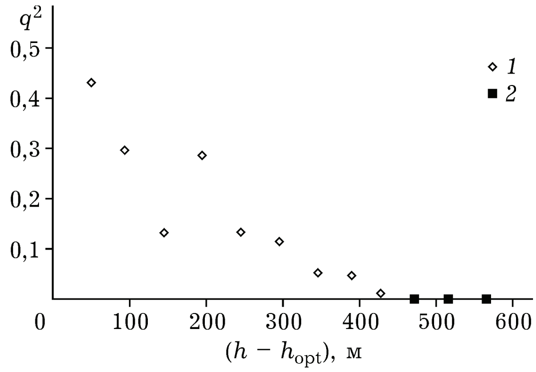

Рис. 3. Встречаемость пихты сибирской в зоне выше высоты h_{opt} = 1044 м (*1* – ценозы с участием пихты; *2* – горно-луговые ценозы)

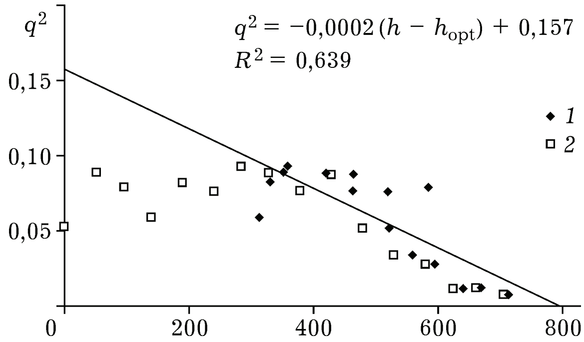

Рис. 4. Встречаемость кедра сибирского в зоне выше высоты h_{opt} = 1044 м (*1* – модифицированные данные; *2* – начальные данные)

раметром порядка и управляющей переменной $X = |h - h_{opt}|$ (рис. 3). Как видно, для пихты критическое значение $h_r = h_{opt} + 0{,}447/0{,}0011 = 1550$ м над ур. м.

Для кедра сибирского *P. sibirica* модель фазовых переходов второго рода описывает высотное распределение деревьев этой породы, если модифицировать управляющую переменную:

$$h' = \frac{|h - h_{opt}|}{1000} + \gamma q_A^{\varepsilon}, \qquad (9)$$

где q_A – доля пихты на высоте h, $\gamma = 2$ и $\varepsilon = 4$ – константы, не зависящие от экспозиции и высоты h.

В уравнении (9) предполагается, что дополнительно к управляющему воздействию, которое зависит от высоты произрастания деревьев, при описании высотно-поясной зональности необходимо учесть воздействие пихты на встречаемость кедра. Согласно (9), в высотных поясах вблизи зоны оптимума произрастания пихты, где величины q_A будут близки к 1, управляющее воздействие на кедр будет увеличиваться, и кедр на этих высотах будет вытесняться пихтой. На верхней и нижней границах произрастания пихты, где $q_A \to 0$ и, согласно (9), $h' \approx h$, воздействие пихты на встречаемость кедра будет минимальным и уравнение (4) будет корректно описывать связь величины q^2 для кедра с высотой произрастания (рис. 4). Критическая высота для кедра сибирского в этом случае равна 1800 м над ур. м.

Судя по тому, что для описания высотно-поясной зональности пихты достаточно использовать в качестве управляющего параметра только высоту h произрастания, можно полагать, что обратный эффект воздействия кедра на пихту отсутствует или очень мал.

Возможна ситуация, когда кроме управляющей переменной на процессы фазового перехода оказывают влияние некоторые дополнительные факторы, например, локальные ландшафтные характеристики территории на высоте h. Тогда дополнительный фактор можно рассматривать как некоторое внешнее экологическое поле U и модифицировать уравнение (4), включив в него член, описывающий воздействие внешнего поля [Брус, Каули, 1984]:

$$G = G_0 + a(X - X_c)q^2 + bq^4 - cUq \Rightarrow \min, \qquad (10)$$

где c – константа.

Тогда условие минимума функции G выразится следующим образом:

$$\frac{\partial G}{\partial q} = 2a(X - X_r)q + 4bq^3 - cU = 0. \qquad (11)$$

В этом случае решение $q = 0$ в (11) исчезает, и существование внешнего поля может привести к тому, что при значении управляющей переменной, большей критического значения X_r, $q > 0$. Если рассматривать модель высотно-поясной зональности лесных насаждений, то наличие дополнительного поля U (например, смещение экспозиции макросклона и увеличение вследствие этого температуры воздуха на высотах, больших критической высоты для определенной древесной породы) приведет к тому, что древесные растения данной породы будут встречаться на высотах, больших критической (рис. 5).

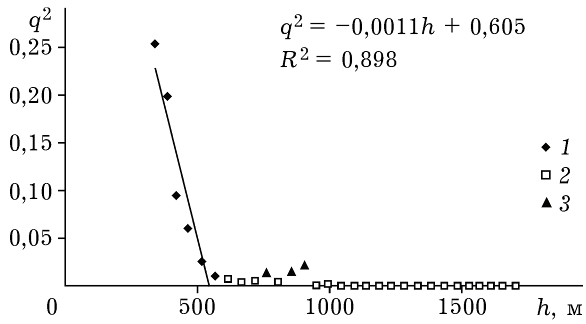

Рис. 5. Встречаемость березы *B. pendula* в Саянах ниже критической высоты h_r = 550 м над ур. м. (*1* – насаждения с участием березы ниже критической высоты; *2* – насаждения без участия березы выше критической высоты; *3* – насаждения с участием березы выше критической высоты)

Заметим, что желательно рассматривать с единой точки зрения последовательность сукцессионных процессов, протекающих в лесных насаждениях. В таежных ценозах после гибели или вырубки коренного насаждения часто наблюдается следующая последовательность сукцессионных переходов: "трава – лес" → "смешанный молодняк – лиственное одновозрастное насаждение" → "лиственное одновозрастное насаждение – хвойное одновозрастное насаждение" (смена пород в насаждении) → "одновозрастное хвойное насаждение – разновозрастное хвойное насаждение". Все эти сукцессионные переходы можно описать с помощью общей модели (4) экологических фазовых переходов второго рода, в которой для каждого из фазовых переходов введено специфическое определение параметра порядка и рассматривается характерное для данного фазового перехода управляющее воздействие.

Так, для сукцессионного перехода "трава – лес" параметр порядка q_{gr} можно определить следующим образом:

$$q_{gr} = \frac{S_0 - \left(\bigcup_{i=1}^{n} S_i - \frac{1}{2} \bigcap_{i,j=1}^{n} S_i S_j \right)}{S_0}, \qquad (12)$$

где n – число деревьев на территории, S_0 – площадь территории, S_i – площадь проекции кроны i-го дерева.

Величина параметра порядка представляет собой долю площади, не покрытой кронами деревьев, к площади всей территории. Для чисто травянистого ценоза q_{gr} = 1, древесный ценоз будет характеризоваться $q_{gr} \to 0$. Управляющая переменная сукцессионного перехода "трава – лес" $X = 1/M_g$, где M_g – фитомасса травянистой растительности на территории. В модели смена травянистого ценоза на древесный происходит при уменьшении фитомассы травянистого ценоза (т. е. при увеличении X) и характеризуется уменьшением параметра порядка.

В модели сукцессионного перехода "смешанный молодняк – лиственное одновозрастное насаждение" в качестве параметра порядка q используется доля деревьев хвойных пород от общего числа деревьев в насаждении, а в качестве управляющей переменной– величина X – отношение суммы площадей проекции крон деревьев в насаждении к площади этого насаждения:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^{m} Q_j}{S_0}, \qquad (13)$$

где Q_j – площадь проекции кроны j-го дерева лиственных пород, m – число деревьев численных пород в насаждении, S_0 – площадь насаждения.

Сукцессионный переход, заключающийся в вытеснении из ценоза молодых деревьев хвойных пород и выражающийся в уменьшении значения параметра порядка, будет происходить при увеличении значения управляющей переменной.

В модели сукцессионного перехода от одновозрастного к разновозрастному насаждению можно ввести величины Θ_i – возраст отдельного дерева в насаждении, и величины $\theta_{min} = \min\{\theta_j\}$ и $\theta_{max} = \max\{\theta_j\}$ – соответственно минимальный и максимальный возраст деревьев в основном ярусе насаждения, T – возраст ценоза ($T \geq \max(\Theta_j)$). В этой модели параметр порядка $q_T = \frac{\Theta_{min}}{\Theta_{max}}$. Для условно одновозрастных насаждений $\theta_{min} \approx \theta_{max}$ и $q_T \to 1$. Для разновозрастных насаждений $\theta_{min} << \theta_{max}$ и $\theta_T \to 0$. Сукцессионный переход от одновозрастного насаждения к разновозрастному начинается при достижении критического возраста T_r ценоза. Уравнение (4) в этом случае представится следующим образом:

$$G = G_0 + a(T - T_r)q_T^2 + bq_T^4. \qquad (14)$$

Универсальность модели фазовых переходов второго рода подтверждается и применимостью ее не только для моделирования сукцессионных переходов, но и для описания различных критических явлений в экосистемах – вспышек массового размножения насекомых [Суховольский и др., 2008], ветровалов и пожаров [Исаев и др., 2010].

В различных ценозах, в зависимости от внешних условий, в ходе экологических фазовых переходов деревья лиственных пород могут заменяться деревьями как темно-, так и светлохвойных пород, или же деревьями нескольких хвойных пород. В этом случае для описания экологических фазовых переходов возможно ввести дополнительные параметры порядка. В частности, для описания верхней границы хвойного пояса в Саянах можно ввести два параметра порядка – параметр порядка q_1, характеризующий долю площади, занятой пихтой, от общей площади на высоте h, и параметр порядка q_2, характеризующей долю площади, занятой кедром, от общей площади территории на высоте h. Так как на высоте h часть территории может быть не покрыта лесом, то $q_1 + q_2 \geq 1$, и в общем случае нельзя, зная значение одного из параметров порядка, вычислить значение другого. Для двухпараметрической модели возможно ввести комплексный параметр порядка с модулем $|\psi|$ и фазой φ [Брус, Каули, 1984]:

$$\psi = q_1 + iq_2 = |\psi| \exp(i\varphi), \qquad (15)$$

где $|\psi| = \sqrt{q_1^2 + q_2^2}$; $\varphi = \mathrm{arctg}\,\dfrac{q_2}{q_1}$; $i^2 = -1$.

В этих случаях функционал Ландау (4) должен быть инвариантен относительно сдвига фазы [Брус, Каули, 1984; Паташинский, Покровский, 1982], и тогда запишем:

$$G = G_0 + a(X - X_r)|\psi|^2 + b|\psi|^4. \qquad (16)$$

В таблице приведены результаты сравнения описаний высотной зональности хвойных лесов в горных условиях Саян с помощью одно- и двухпараметрической моделей. Как видно, коэффициенты детерминации регрессионного уравнения (8) для двухпараметрической модели несколько больше, чем для однопараметрической, и в целом двухпараметрическая модель дает более точную оценку верхней границы произрастания хвойных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известно, что для фазовых переходов второго рода в физических системах выполняется принцип универсальности, согласно которому тип уравнения для фазового перехода зависит только от размерности пространства, в котором существует моделируемый объект, и от числа параметров порядка, используемых для описания процесса [Брус, Каули, 1984]. Использование принципа универсальности упрощает процесс построения модели фазовых переходов для конкретной системы, так как заранее известен вид модельного уравнения. Для моделей фазовых переходов, в которых введен только один параметр порядка и одна управляющая переменная, фазовые переходы в различных сложных системах описываются одной и той же моделью. Специфичность же описания фазовых переходов зависит от выбора параметров порядка, характеризующих процессы в данной системе, и управляющей пере-

Сравнение описания высотной зональности хвойных лесов в горных условиях Саян

Границы высотного пояса хвойных	Число параметров порядка	Параметры уравнения (8)			Модельная оценка h_r, м над ур. м.	Оценка h_r по натурным данным, м над ур. м.
		α	β	R^2		
Нижняя граница	1	1,008	0,0012	0,934	204	ниже 300
	2	0,587	0,0007	0,951	205	
Верхняя граница	1	1,021	0,0011	0,829	1970	~1700
	2	0,602	0,0008	0,942	1796	

менной, воздействие которой приводит к возникновению фазовых переходов.

Проведенный анализ показал, что модели фазовых переходов второго рода позволяют описать происходящие в лесных ценозах экологические процессы на языке физической теории конденсированных состояний [Ландау, Лифшиц, 1964]. Модельные расчеты изученных экологических процессов хорошо согласуются с данными натурных наблюдений. Используемые в общей модели (4) свободные параметры, характеризующие конкретные типы экологических фазовых переходов, могут быть вычислены по натурным данным и использованы для прогнозных расчетов сукцессий в лесу.

Если предполагать, что закономерности, связанные с фазовыми переходами в сложных системах, носят общий характер и не зависят от типа изучаемой системы, то из принципа универсальности следует, что для описания сукцессионных процессов в различных лесных ценозах можно использовать универсальную модель (4). Предложенный подход позволяет использовать для анализа сукцессионных процессов натурные данные, полученные для разных насаждений, находящихся на различных этапах сукцессии.

При использовании в модели фазовых переходов одного параметра порядка число возможных сукцессионных переходов ограничено, и эти переходы фактически детерминированны. В моделях фазовых переходов с двумя или тремя параметрами порядка число возможных фаз возрастает [Брус, Каули, 1984], и становятся возможными различные сценарии сукцессионных изменений в лесных ценозах.

Для модели экологических фазовых переходов значение управляющей переменной (фитомассы древесного яруса), определяется экологическими процессами в ценозе. Если дополнительно к модели экологических фазовых переходов ввести уравнение роста фитомассы насаждения, то можно оценить, в каком возрасте фитомасса лиственного насаждения достигает своего критического значения. Тогда совместный анализ уравнений роста фитомассы и фазового перехода может позволить перейти к динамическому описанию сукцессионных процессов.

Работа поддержана РФФИ (гранты 10-04-00256, 12-05-00494).

ЛИТЕРАТУРА

Брус А., Каули Р. Структурные фазовые переходы. М.: Мир, 1984. 408 с.

Исаев А. С., Суховольский В. Г., Бузыкин А. И., Овчинникова Т. М. Сукцессии в лесных ценозах: модель фазового перехода второго рода // Журн. общ. биологии. 2009. Т. 70, № 6. С. 451–458.

Исаев А. С., Суховольский В. Г., Хлебопрос Р. Г. Метамодельные подходы к описанию критических явлений в лесных экосистемах// Лесоведение. 2010. № 2. С. 3–13.

Исаев А. С., Овчинникова Т. М., Суховольский В. Г., Мочалов С. А., Сотниченко Д. Л. Сукцессионные процессы в лесных ценозах: модель фазовых переходов второго рода// Там же. 2012. № 3. С. 3–11.

Исмаилова Д. М., Бабой С. Д., Гостева А. А., Назимова Д. И. Применение ГИС для анализа связи лесной растительности с рельефом на примере барьерно-дождевых ландшафтов Западного Саяна // Геоинформатика. 2011. № 3. С. 29–35.

Кайрюкштис Л. Научные основы формирования высокопродуктивных елово-лиственных насаждений. Л.: Лесн. пром-сть. 1969. 208 с.

Комаров А. С. Модели сукцессии растительности и динамики почв при климатических изменениях // Компьютерные исследования и моделирование. 2009. Т. 1, № 4. С. 405–413.

Ландау Л. Д. К теории фазовых переходов // ЖЭТФ. 1937. Т. 7. С. 19.

Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 567 с.

Логофет Д. О. Марковские цепи как модели сукцессии // Лесоведение. 2010. № 2. С. 46–52.

Паташинский А. З., Покровский В. Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. М.: Наука, 1982. 382 с.

Поликарпов Н. П., Чебакова Н. М., Назимова Д. И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 225 с.

Рыжкова В. А., Корец М. А., Черкашин В. П. Оценка современного состояния, восстановительной динамики и биоразнообразия лесных экосистем на основе ГИС // Сиб. экол. журн. 2004. № 5. С. 715–724 [Ryzhkova V. A., Korets M. A., Cherkashin V. P. Estimating Current Forest Ecosystem State, Regeneration, and Biodiversity Using GIS Technologies // Contemporary Problems of Ecology. 2004. N 3].

Суховольский В. Г., Исхаков Т. Р., Тарасова О. В. Оптимизационные модели межпопуляционных взаимодействий. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2008. 162 с.

Carmel Y., Kadmon R., Nirel R. Spatiotemporal predictive models of Mediterranean vegetation dynamics // Ecol. Appl. 2001. Vol. 11. P. 268–280.

Guisan A., Zimmermann N. E. Predictive habitat distribution models in ecology// Ecological Modelling. 2000. Vol. 135. P. 147–186.

He H. S., Mladenoff D. J., Crow T. R. Linking an ecological model and a landscape model to study forest species response to climate warming // Ibid. 1999. Vol. 114. P. 213–233.

Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova E. EFIMOD 2 – A model of growth and elements cycling in boreal forest ecosystems // Ibid. 2003. Vol. 170, N 2-3. P. 373–392.
Lafon C. W. Ice-storm disturbance and long-term forest dynamics in the Adirondack Mountains // J. Veg. Sci. 2004. Vol. 15. P. 267–276.
Li B. L. A theoretical framework of ecological phase transition for characterizing tree-grass dynamics// Acta biotheoretica. 2002. Vol. 50. P. 141–154.
Miller C., Urban D. L. A model of surface fire, climate and forest pattern in the Sierra Nevada, California // Ecological Modelling. 1999. Vol. 114. P. 113–135.
Perry G. L. W., Millington J. D. A. Spatial modelling of succession-disturbance dynamics in forest ecosystems: concepts and examples // Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics. 2008. Vol. 9. P. 191–210.
Shugart H. H. Terrestrial Ecosystems in Changing Environments. Cambridge Studies in Ecology. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 537 p.

The Universality Principle in Using Second-Order Phase Transition Models for Description of Succession Processes in Forests

A. S. ISAEV[1], T. M. OVCHINNIKOVA[2], S. D. BABOI[2], V. G. SOUKHOVOLSKY[2]

[1] Center for Forest Ecology and Productivity RAS
117810, Moscow, Profsoyuznaya str., 84/32

[2] V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: soukhovolsky@yandex.ru

To describe the successional processes in forest coenoses and spatial distribution of tree species the approach using models of phase transitions was proposed. We introduced a variable equation and phase transition models that describe processes in forest coenoses. The analysis showed that the model considering processes in the forest as a second order phase transitions was in good agreement with the field data. The model parameters can be calculated from the data of field observations and used for the prognosis calculations of successional processes in forest and the distribution of important tree species in high-altitude forest. The proposed approach to the modeling of dynamic processes in the forest as phase transitions is universal that greatly simplifies the task of constructing models of forest dynamics.

Key words: forest stands, tree species, succession, high-altitude forest, models, phase transitions.