

УДК 51:502.4 (671.621)

## ИНДИВИДУАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ДРЕВЕСНЫХ СООБЩЕСТВ

© 2009 А.Н. Колобов

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, г. Биробиджан;  
e-mail: alex\_0201@mail.ru

Рассмотрены результаты построения и исследования математической модели, описывающей пространственно-временную динамику древесных сообществ. Проведены вычислительные эксперименты с различными наборами исходных данных. В качестве результатов моделирования исследователь получает различные прогнозные сценарии развития леса.

Ключевые слова: *индивидуально-ориентированная модель, межвидовая конкуренция, пространственная структура.*

### ВВЕДЕНИЕ

Центральным звеном в структуре практически любого биоценоза являются сообщества растений. Они не только служат основными источниками органического вещества, но оказываются теми структурными компонентами, которые целиком определяют облик и структуру биоценозов. В то же самое время лесные древесные растения широко используются в различных сферах промышленности, подвергаются различным видам антропогенного воздействия.

Рациональное ведение лесного хозяйства требует предварительной разработки эффективных стратегий управления, обеспечивающих оптимальные сценарии восстановления и развития леса. Основная проблема, с которой сталкиваются исследователи при изучении этих процессов, связана с их большой продолжительностью во времени. Для исследования динамики лесных ценозов и успешного управления ими широко применяются средства математического и компьютерного моделирования. Модель развития многовидового разновозрастного лесного ценоза характеризуется большим количеством параметров, включает различные математические зависимости, требующие проверки многочисленных условий и ограничений. Поэтому для решения поставленной задачи был выбран метод численного имитационного компьютерного моделирования. Для реализации модели на ЭВМ разработано соответствующее программное обеспечение.

В данной работе приводятся результаты построения и исследования математической модели динамики древостоев. В качестве результатов моделирования исследователь получает различные прогнозные сценарии развития леса. Изучая полученные сценарии при различных модельных стратегиях управления, можно выбрать наиболее

эффективную стратегию в зависимости от поставленной цели хозяйствования. Кроме этого модель имеет теоретическую ценность, поскольку позволяет изучать и выявлять закономерности роста и взаимодействия различных видов деревьев в сообществе.

### ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

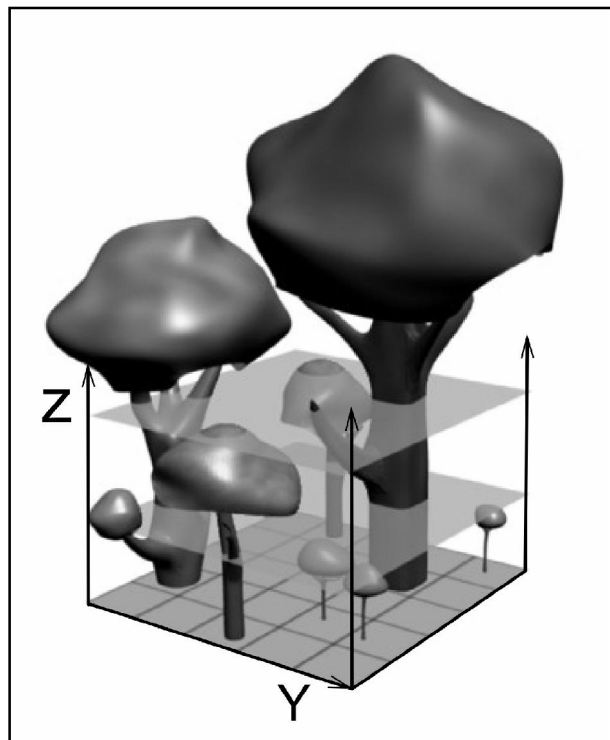
Модель, рассматриваемая в данной работе, основывается на индивидуально-ориентированном имитационном подходе, который возник в последние десятилетия и широко применяется в современных моделях древостоя [6, 7, 8, 10, 11]. Данный подход позволяет рассматривать динамику моделируемой системы как результат взаимодействия множества дискретных объектов, из которых она состоит, расположенных в пространстве и изменяющих согласно тем или иным правилам свои характеристики с течением времени. Таким образом, в основу построения модели легли следующие положения:

1. Моделируемое пространство древостоя разбивается на ячейки по горизонтальной плоскости и уровни по вертикали.
2. Элементарной структурной единицей лесного сообщества является дерево.
3. Моделирование древостоя складывается из моделирования динамики отдельных деревьев.
4. При моделировании динамики отдельного дерева учитывается влияние со стороны других деревьев.

Моделирование динамики древостоя складывается из моделирования роста каждого дерева входящего в его состав, посредством дифференциальных уравнений и функций, которые позволяют рассчитать основные таксационные характеристики. Деревья размещены в пространстве и оказывают взаимное влияние друг на друга

через изменение, в результате конкуренции, доли внешних ресурсов, приходящихся на данное растение.

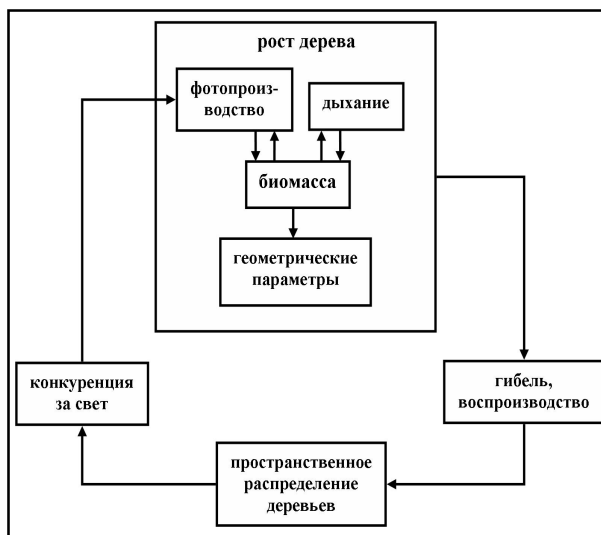
Перечисленный набор положений вполне достаточен для получения непрерывно меняющейся во времени мозаики локальных неоднородностей пространства. На рис. 1. показана пространственная структура моделируемого участка леса.



**Рис. 1.** Пространственная структура моделируемого леса. Моделируемое пространство делится на ячейки по горизонтальной плоскости и слои по вертикали

Моделируемое пространство разбивается на ячейки по горизонтальной плоскости и слои по вертикали. В каждой ячейке одновременно может находиться только одно дерево, размер ячейки составляет 40 x 40 см. В результате, каждое дерево прикрепляется к какой-либо ячейке, имеет свои координаты, что решает вопрос о пространственном расположении. Разбиение на ячейки такого размера позволяет существенно упростить алгоритм модели, например поиск ближайших соседей при расчете индексов конкуренции, и сократить время работы программы. Деление пространства на уровни по вертикали позволяет учитывать взаиморасположение деревьев и соответственно их влияние друг на друга при расчете светового довольствия.

Модель динамики древостоя включает в себя несколько подмоделей, отражающих процессы жизнедеятельности и взаимодействия деревьев. На рис. 2 показана схема подмоделей и их взаимодействий.



**Рис. 2.** Структурная схема модели динамики древостоя

В первом блоке «рост дерева», просчитывается прирост биомассы и некоторых геометрических параметров: объема, высоты, диаметра ствола, диаметра кроны. Прирост биомассы определяется интенсивностью фотосинтеза, который зависит от количества падающего света. Количество света, приходящегося на данное дерево, рассчитывается в подмодели «конкуренция за свет», определяется степенью затенения со стороны окружающего древостоя.

Блок «гибель и воспроизводство» отвечает за семенное размножение и отмирание деревьев в сообществе. На каждом шаге моделирования, который равен одному году, осуществляется процедура рассеивания семян, которая задается соответствующими вероятностными процессами. Просчитывается вероятность прорастания семени того или иного вида в данной точке пространства, которая определяется количеством особей данного вида способных к плодоношению, а также расстоянием от этих особей до рассматриваемой точки. Помимо этого задается вероятность прорастания семени в случае неблагоприятно сложившихся условий (высокая трава, грызуны и т.д.).

Отмирание деревьев происходит в результате естественного старения и конкуренции за ресурсы жизнедеятельности. Для каждого вида дерева задается некоторая средняя продолжительность жизни, начиная с которой вычисляется вероятность гибели растения, которая тем выше, чем больше отклонение от этой средней величины. Конкуренция между деревьями вызывает нехватку света, в результате чего скорость роста замедляется и с некоторого момента времени может начаться отрицательный прирост биомассы, т.е. опад ветвей и зеленой части. Ког-

да отрицательный прирост биомассы превышает определенное значение, дерево погибает. Кроме этого учитывается так называемая дискриминационная компонента смертности, обнаруженная на натурном материале и описанная в работе [1], которая проявляется в виде интенсивной гибели деревьев, отставших в своем развитии от среднего по популяции дерева. Происходит отмирание тех деревьев, которые сильно отстают в росте диаметра, когда он становится ниже заданной критической величины для данного возраста

Каждое дерево в древостое имеет свои пространственные координаты. Размещение деревьев на некоторой моделируемой территории и, соответственно, вычисление пространственных координат осуществляется в блоке «пространственное распределение деревьев».

Все блоки модели взаимосвязаны между собой и образуют замкнутую, циклическую систему. Пространственная структура древостоя определяет распределение световых ресурсов и вызывает напряженность конкурентных отношений между отдельными особями. Конкурентные процессы влияют на рост деревьев, что в конечном итоге приводит к их ослаблению и отпаду. Это в свою очередь изменяет пространственную структуру, формируя новые конкурентные отношения. Таким образом, осуществляется двусторонняя связь между пространственной структурой и динамикой роста отдельных деревьев, что в совокупности определяет общую динамику древостоя.

В результате взаимного затенения количество падающей солнечной радиации в древесном сообществе постоянно меняется. Поэтому на каждом шаге моделирования необходимо рассчитывать световой режим во всех точках моделируемого пространства. Для описания светового режима древостой разбивается на слои. Кроны деревьев аппроксимируются плоскими светопоглощающими экранами, которые отображаются в соответствующий слой в зависимости от высоты дерева, как показано на рис. 3.

Способность данного экрана поглощать свет зависит от возраста и видовой принадлежности дерева. При расчете светового довольствия в произвольной точке происходит наложение вышележащих слоев, таким образом, получаем суммарный коэффициент пропускания света. Для устранения влияния краевого эффекта осуществлялось замыкание границ участка, применяя топологию тора.

Для описания роста дерева в качестве исходного пункта использовали модель свободного роста дерева, предложенную в работе И.А. По-

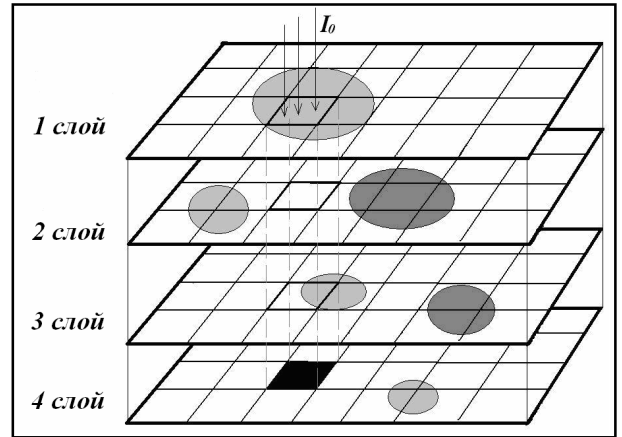


Рис. 3. Вертикальная структура моделируемого участка леса. Для расчета светового режима, древостой разбивается на слои, в которые проецируются кроны деревьев

летаева [4]. Она построена на основе балансового принципа и записана в форме закона сохранения энергии. Согласно этой модели, дерево получает энергию только путем фотосинтеза, свободная энергия расходуется на нужды фотосинтеза, на построение живой ткани и на подъем раствора из почвы.

Окончательно полученная система уравнений роста дерева с учетом влияния конкуренции со стороны окружающего древостоя записывается в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{\alpha \cdot (1 - \exp(-k \cdot V)) \cdot P_m \cdot Q}{\alpha \cdot (1 - \exp(-k \cdot V)) \cdot Q + P_m \cdot (k \cdot V)} \cdot bV - cVH \\ \frac{dH}{dt} = \alpha H \cdot (H_{\max} - H) \\ D = \sqrt{\frac{4V}{\pi \cdot H \cdot f}} \end{cases},$$

где  $V$  - объем дерева,  $H$  - высота,  $D$  - диаметр,  $E$  - интенсивность фотосинтеза единицы листовой поверхности,  $Q$  - доля солнечной радиации при затенении окружающим древостоем,  $f$  - видовое число, показывающее отклонение от идеального цилиндра.

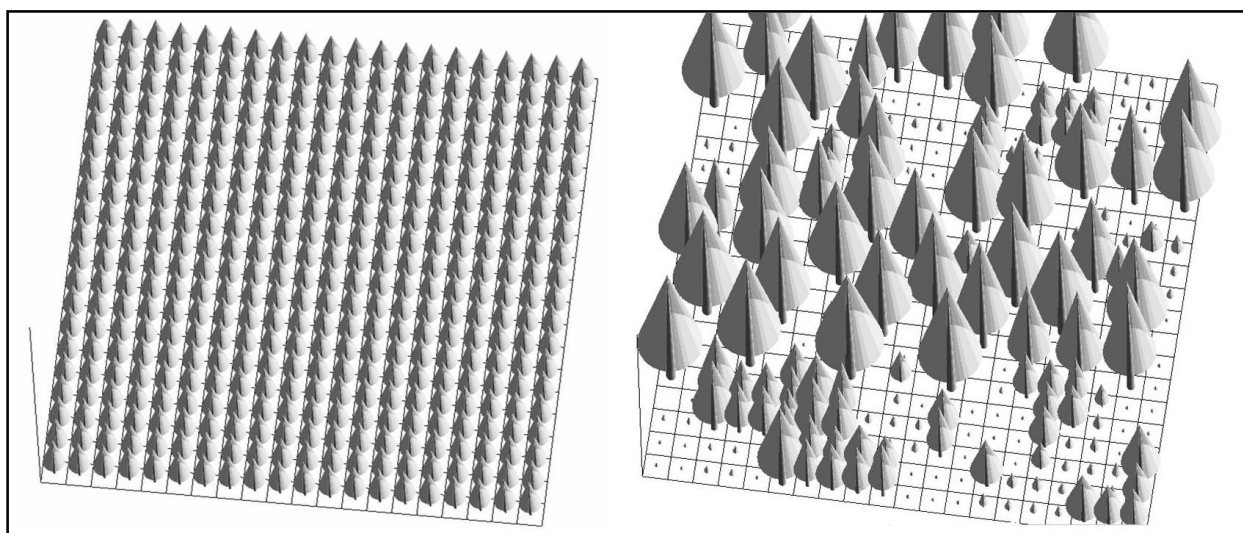
Величина  $Q$  является нормированной, изменяется в пределах  $0 \leq Q \leq 1$ , выражается моделью Монси и Саеки [9]. Согласно этой модели коэффициент пропускания света зависит от плотности растительного покрова и толщины слоя. Зависимость ослабления радиации растительным покровом записывается в виде:  $Q_z = \exp(-kL_z)$  где:  $Q_z$  - доля солнечной радиации внутри растительного покрова на высоте  $z$ ,  $L_z$  - суммарная листовая поверхность древостоя выше уровня  $z$ ,  $k$  - коэффициент экстинкции.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования показали, что виды, имеющие примерно одинаковую скорость роста и размеры, но разную степень пропуска света, не могут длительное время сосуществовать на одной территории. При взаимодействии двух видов вид, который слабее пропускает свет, постепенно вытесняет второй, при всех остальных равных параметрах. При этом если изменять скорость роста угнетенного вида, то можно добиться того, что виды будут успешно сосуществовать. Таким образом, конкурентные взаимодействия зависят не только от степени

взаимного затенения, но в значительной мере определяются характером кривой роста дерева.

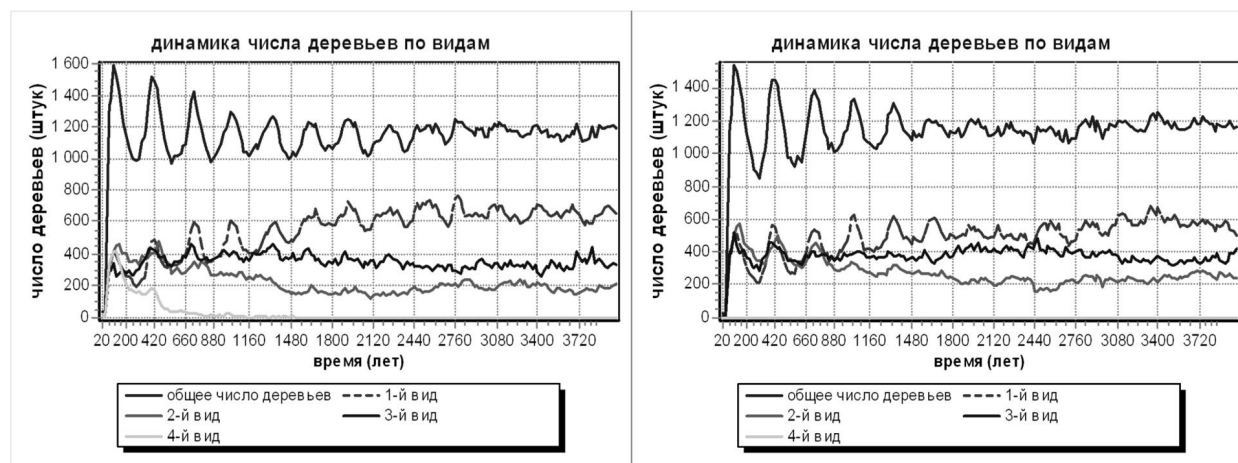
Исследования модели также показало, что в результате внутривидовой конкуренции за свет возникают неоднородные пространственные распределения растительных сообществ. Наблюдаемые в процессе моделирования скопления и пустоты, взаимно сменяющие друг друга, вполне соответствуют ярусно-мозаичной концепции [3, 5], которая рассматривает лесной ценоз как систему пространственных мозаик, состоящих из асинхронно развивающихся пятен, находящихся на разных стадиях развития.



**Рис. 4.** Пример образования пространственно неоднородного распределения деревьев в результате внутренних взаимодействий

Для изучения динамики многовидовых древесных насаждений проведены вычислительные эксперименты с некоторым набором основных лесообразующих пород Дальнего Востока. В ка-

честве исследуемых видов, были рассмотрены: Ель, Пихта, Кедр и Береза. На рис. 2. приведены модельные сценарии динамики трехвидового древесного сообщества (Ель, Пихта, Кедр).



**Рис. 5.** Модельные сценарии динамики древесных сообществ

Как видно из графиков, виды Ель, Пихта, Кедр устойчиво сосуществуют на одной территории. Причем Ель по количеству деревьев на данной территории занимает первое место. Такая динамика вполне соответствует действительности, сочетание этих видов деревьев характерно для пихтово-еловых лесов Дальнего Востока. В следующей серии модельных экспериментов к данному сообществу добавляли особи Березы, которая является светолюбивым видом. Как видно из левого графика на рис. 5. (самая нижняя кривая), Береза постепенно начинает вымирать и уже к концу второго поколения, практически полностью исчезает, не выдерживая конкуренции со стороны более теневыносливых видов.

Во всех этих экспериментах структура древостоя формировалась таким образом, что доминирующее положение занимали теневыносливые виды. Это можно объяснить тем, что под пологом светолюбивого вида, в данном случае Березы, постепенно формируется ярус из более теневыносливых видов: Ели, Пихты, Кедра. Благодаря своей теневыносливости молодые деревья этих видов свободно растут под пологом верхних ярусов, образуя следующие поколения, не позволяя при этом нормально развиваться особям светолюбивого вида.

Таким образом, построенные модельные сценарии динамики древостоя продемонстрировали, что в данных климатических условиях Ель оказывается самым сильным конкурентом, Береза самым слабым видом. При этом Пихта, Ель и Кедр сосуществуют на одной территории.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная имитационная модель динамики древостоя позволяет проводить вычислительные эксперименты с различными наборами исходных данных (всевозможные комбинации видовой и возрастной структуры древостоя). В качестве результатов моделирования исследователь может получить различные статистические данные, например общий запас биомассы, суммарное количество особей того или иного вида, представленные в виде графиков. Предусмотренная в программе визуализация деревьев на координатной плоскости, наглядно демонстрирует пространственно-временную динамику леса.

Модель позволяет строить прогнозные сценарии развития древостоев, в том числе сценарии восстановления после различных видов наруше-

ний. Несет в себе теоретическую ценность, помогая исследователю изучать и выявлять закономерности роста и взаимодействия различных видов деревьев в сообществе. Помимо этого, ее можно успешно применять в практических целях, при разработке различных стратегий лесопользования.

Исследования проведены при финансовой поддержке ДВО РАН (в рамках Программы Президиума РАН № 23 «Биоразнообразию»), проект № 09-И-П23-12 и РФФИ (проект № 09-04-00146-а).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузыкин А.И., Гавриков В.Л., Секретенко О.П., Хлебопрос Р.Г. Анализ структуры древесных ценозов. Новосибирск: Наука, 1985.
2. Корзухин М.Д., Тер-Микаэлян М.Т. Модель многовидового фитоценоза при конкуренции особей за свет // Исследования по математической популяционной экологии. Владивосток, 1983. С. 100-115.
3. Коротков В.Н. Новая парадигма в лесной экологии // Биол. науки. 1991. Т. 8. С. 7-20.
4. Полетаев И.А. Проблемы кибернетики. 1966. Т. 16. С. 171-190.
5. Смирнова О.В., Чистякова А.А., Попадюк Р.В. и др. Популяционная организация растительного покрова лесных территорий (на примере широколиственных лесов европейской части СССР). Пушино: НЦБИ, 1990. 92 с.
6. Чумаченко С.И. Базовая модель динамики многовидового разновозрастного лесного ценоза // Вопросы экологии и моделирования лесных экосистем. М.: МЛТИ, 1993. С. 147-180.
7. Chave J. Study of structural, successional and spatial patterns in tropical rain forests using TROLL, a spatially explicit forest model // Ecological Model. 1999. V. 124. P. 233-254.
8. Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L. et al. EFIMOD 2 - A model of growth and elements cycling of boreal forest ecosystems // Ecological Modelling. 2003. V. 170. P. 373-392.
9. Monsi M., Saeki T. Uber den Lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die Stoffproduktion. // Jap. J. Bot. 1953. V. 14, № 1. P. 22-52.
10. Huth A., Ditzer T. Long-term impact of logging in a tropical rain forest – a simulation study // Forest Ecology and Management. 2001. V. 142. P. 33-51.
11. Huth A., Ditzer T. Simulation of the growth of a lowland Dipterocarp rain forest with FORMIX3 // Ecol. Model. 2000. V. 134. P. 1-25.

## **INDIVIDUAL-BASED MODEL OF WOOD COMMUNITIES DYNAMICS**

© 2009 A.N. Kolobov

Institute of the complex analysis of regional problems Far Eastern Branch  
Russian Academy of Sciences, Birobidzhan;  
e-mail: alex\_0201@mail.ru

The results of study and construction of a simulation model describing the spatial-temporal dynamics of plant communities are considered. The computative experiments with different sets of input data are carried out. As the simulation results the researcher receives a different projection scenarios for the development of forest.

Key words: *individual-based model, inter-species competition, spatial distribution.*