

L-СИСТЕМЫ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ ВЕГЕТАТИВНОЕ РАЗМНОЖЕНИЕ И СТАДИИ ОНТОГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ

^{1,2}Калмыков В.Л., ²Хасанова Л.М., ²Шпак А.Б., ²Гомов Е.Е.

¹Институт биофизики клетки РАН, г.Пушино

² Пушинский государственный университет, Учебный центр «Биомедицинской инженерии» на базе Института биологического приборостроения РАН, г.Пушино

shpakntn@rambler.ru

В настоящей работе мы представляем три L-системы, которые моделируют вегетативное размножение растений и позволяют одновременно представить несколько потомков различного возраста. Данные L-системы были получены в результате комбинирования «геномов» (логических формул итерационной генерации) различных L-систем – прототипов. Развитие данного модельного подхода в перспективе позволит решить наиболее трудную задачу математического моделирования – задачу биологического морфогенеза.

Проблема математического моделирования онтогенетического развития в настоящее время остается нерешенной. Традиционные математические методы не позволяют осуществить целостное моделирование развивающихся систем. Обнадеживающие результаты получены только с помощью клеточных автоматов[1,3,4] и L-систем. L-системы могут рассматриваться как клеточные автоматы, в которых окрестность размножения определяется генератором (подстановочной формулой). В настоящей работе мы представляем три L-системы, которые моделируют вегетативное размножение растений и позволяют одновременно представить несколько потомков различного возраста. Данные L-системы были получены в результате комбинирования «геномов» (логических формул итерационной генерации) различных L-систем – прототипов. В частности, скрещивали «геномы» «Дерева» и «Дракона Хартера-Хайвея», «Дерева» и «Ковра Серпинского». Одна L-система была получена логическим проектированием с целью моделирования размножения и развития структур. Получены модели небольших групп растений разного возраста. В работе представлены как графические объекты, так и логические формулы полученных L-систем. Развитие данного модельного подхода в перспективе позволит решить наиболее трудную задачу математического моделирования – задачу биологического морфогенеза. Данное направление относится к так называемой «искусственной жизни» [2]. Это направление постулирует наличие в основе живых систем универсальной функциональной схемы. Предполагается, что эта схема может быть реализована на различной элементной базе. Нам известна молекулярная основа реализации жизни. В «искусственной жизни» предполагается возможность переноса универсальной функциональной схемы живого на другие носители – например на твердое тело (в том числе на поверхность кремния) с созданием соответствующего твердотельного живого суперкомпьютера. Сегодня данная задача в полном объеме ещё не реализована, но существует целый ряд математических и компьютерных моделей, которые воспроизводят отдельные характерные особенности формы и поведения живых систем.

В конце пятидесятых годов Хомский использовал эти алгоритмы для описания формальных грамматик [6], а в 1968 году биолог Аристид Линденмаер (по имени которого и были названы L-системы) использовал генерацию структур на основе последовательно (итерационно) перезаписываемых правил для моделирования морфогенеза растений[5]. L-системы иначе называются переписываемыми алгоритмами генерации математических структур[5]. В 1975 году подобные структуры были названы Бенуа Мандельбротом «фракталами»[7]. L-системы, получающиеся на каждом из последовательных этапов генерации масштабируются к исходно заданным размерным ограничениям («чувствительны к окружающей среде»). Это позволяет удержать в пределах экрана изображение быстро разрастающейся структуры. Главные свойства графических объектов L-структур - симметрия и *фрактальность* (самоподобие). Красота (сложная симметрия) и фрактальность лежат, по-видимому, в основе мира живого. Логические формулы генерации L-систем могут рассматриваться как аналог *генома*. Новые

структуры были получены нами в основном в результате перекомбинирования данных логических формул генерации. Использовались принципы генетических алгоритмов (кроссинговера). Применялось также прямое логическое проектирование новых L-систем и комбинированные подходы.

Для моделирования L-систем мы использовали бесплатную свободнораспространяемую программу Mkokh. В основе работы этой программы лежат итерационные подстановочные модификации исходной формулы так называемой черепаший графики. Черепаший графика - это программируемое с помощью простых команд рисование линий на экране компьютера. Метафора состоит в том, что программист как будто бы управляет движением черепашки с помощью крайне простого набора команд. Черепашка, ползая по экрану, «рисует», оставляя за собой след «на песчаном пляже». При этом цель программиста – управлять черепашкой так, чтобы она нарисовала нужную ломаную линию. Команды управления черепашкой просты: сделать шаг вперёд (обозначается F), повернуть направо (обозначается +), повернуть налево (обозначается -), сделать шаг вперёд без перерисовки (прыжок, обозначается B). Вот из этих команд и составляется сценарий построения линии – строка команд. Величина одного шага и угол одного поворота при движении черепашки всегда остаются постоянными и задаются предварительно.

Например, F++F++F это равносторонний треугольник, если угол поворота равен $\pi/3$ (т.е. $180/3$).

А вот данные для построения «куста» (формула взята с www.rechka.ru).




axiom = F

newF = -F+F+[+F-F-]-[-F+F+F]

Угол поворота = $\pi / 8$

При последовательном увеличении числа шагов, выполняемых программой с использованием этого стиля генерации L-систем, получают развивающиеся структуры (результат каждый раз автоматически масштабируется к заданному формату рамки).

Таблица 1. Итерационные модификации фрактала «Куст»

2 итерационных шага	3 итерационных шага	4 итерационных шага
		

Итерационные модификации исходной формулы черепаший графики реализуются как последовательные замены простейших элементов исходной формулы-аксиомы (элементы «F», «B», «X», «Y») на определенные заданные структуры (так называемые «новые элементарные элементы» - «New F», «New B», «New X», «New Y» соответственно), написанные на том же языке. В частности:

new F – логическая формула графики, которая подставляется вместо F на каждом следующем шаге работы программы.

new B – логическая формула графики, которая подставляется вместо B.

Надо заметить, что программа Mkokh может нарисовать график сразу, а может осуществлять его пошаговое выполнение – тогда новый элемент (например, очередная ветка «растущего» куста) появляется на экране только после очередного нажатия кнопки. Это удобно для иллюстрации последовательных стадий процесса (например, роста и ветвления растения).

L-системы можно создавать логическим проектированием по определенному задуманному плану. Предварительно проводится расчет углов и проектируются формулы подстановки фигур в элементы формулы-аксиомы. Такой принцип работы приводит к более или менее запланированному результату, который в дальнейшем редактируется для получения наиболее совершенной системы. Второй метод создания новых L-систем можно назвать методом *генетических алгоритмов*. Этот метод был заимствован у живых организмов. Он включает в себя в основном механизмы кроссинговера. В качестве «хромосом» (генотипа) L-систем выступают записи формул алгоритмов, на основании которых происходит генерация графического объекта.

Геометрические фракталы применяются для получения изображений деревьев, кустов, береговых линий и т. д. Алгебраические и стохастические — при построении ландшафтов, поверхности морей, карт раскраски моделей биологических объектов и др. И те и другие хорошо знакомы сегодня всем – они формируют ландшафты и растительные объекты в современных компьютерных играх. Помните елки, лиственные деревья и кусты вдоль виртуальных автострад? Но для биологов главное, что L-системы моделируют последовательные шаги естественного морфогенеза этих растений.

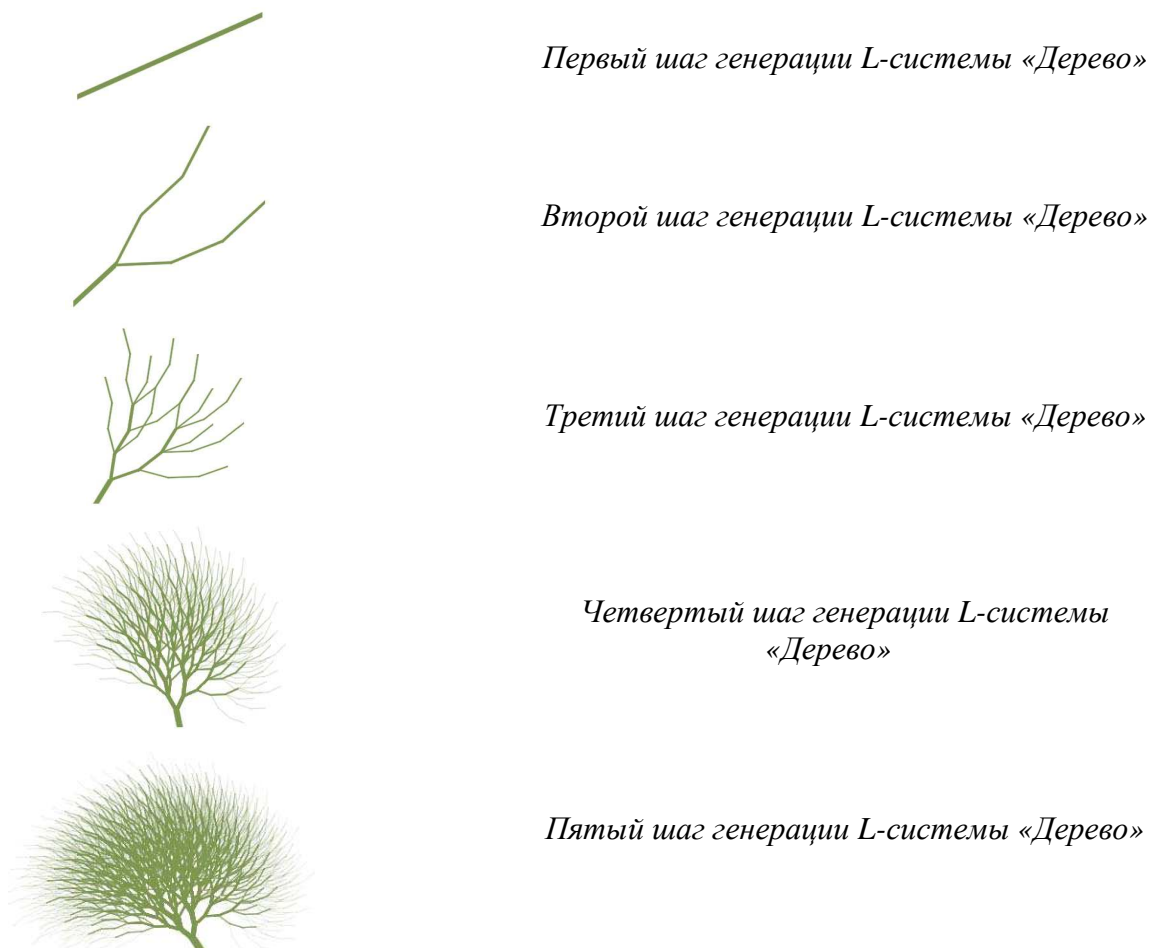


Рис 1. Пять предфракталов последовательно возрастающих порядков L-системы «Дерево».

Программа M-Kokh. Алгоритм генерации данной L-системы взят из библиотеки геометрических фракталов данной программы

Целью работы было создание новых биоподобных L-систем с размножением и с одновременным наличием организмов, находящихся на различных стадиях онтогенетического развития.

Полученные результаты. L-система «Вегетирующее дерево» с числом поколений равным 4 возникла в результате «скрещивания» прототипов «Дракон Хартера-Хайвея» и «Дерево». В New F прототипа «Дракон Хартера-Хайвея» скопировали New F прототипа «Дерево», в качестве New X и New Y были оставлены данные из «Дракона Хартера-Хайвея», начальный угол ρ_1 изменили с $13/24$ на $-4/24$, XY угол ρ_1 изменили с $1/2$ на $1/12$. Число шагов в полученной L-системе равно 6.

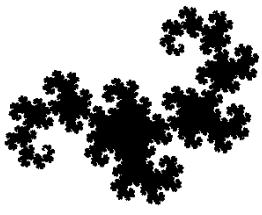
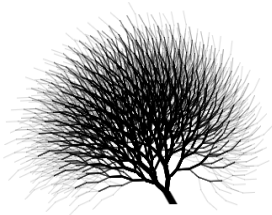


Рис 2. Семь предфракталов последовательно возрастающих порядков (a, b, c, d, e, f, g) L-системы «Вегетирующее дерево». Программа M-Kokh.

Таблица 2. Характеристика L-системы «Вегетирующие дерево»

Дракон Хартера-Хайвея + Дерево	
	
Аxiom	FX
New F	-F[-F+F-F]+[+F-F-F]
New X	X+YF+
New Y	-FX-Y
Угол pi	-4/24
XY угол pi	1/12
Число шагов	6

Таблица 3. Характеристики прототипов с характерными картинками

Дракон Хартера-Хайвея		Дерево
		
Аxiom	FX	F
New F	F	-F[-F+F-F]+[+F-F-F]
New X	X+YF+	
New Y	-FX-Y	
Угол pi	13/24	-1/8
XY угол pi	1/2	1/9
Число шагов	17	5

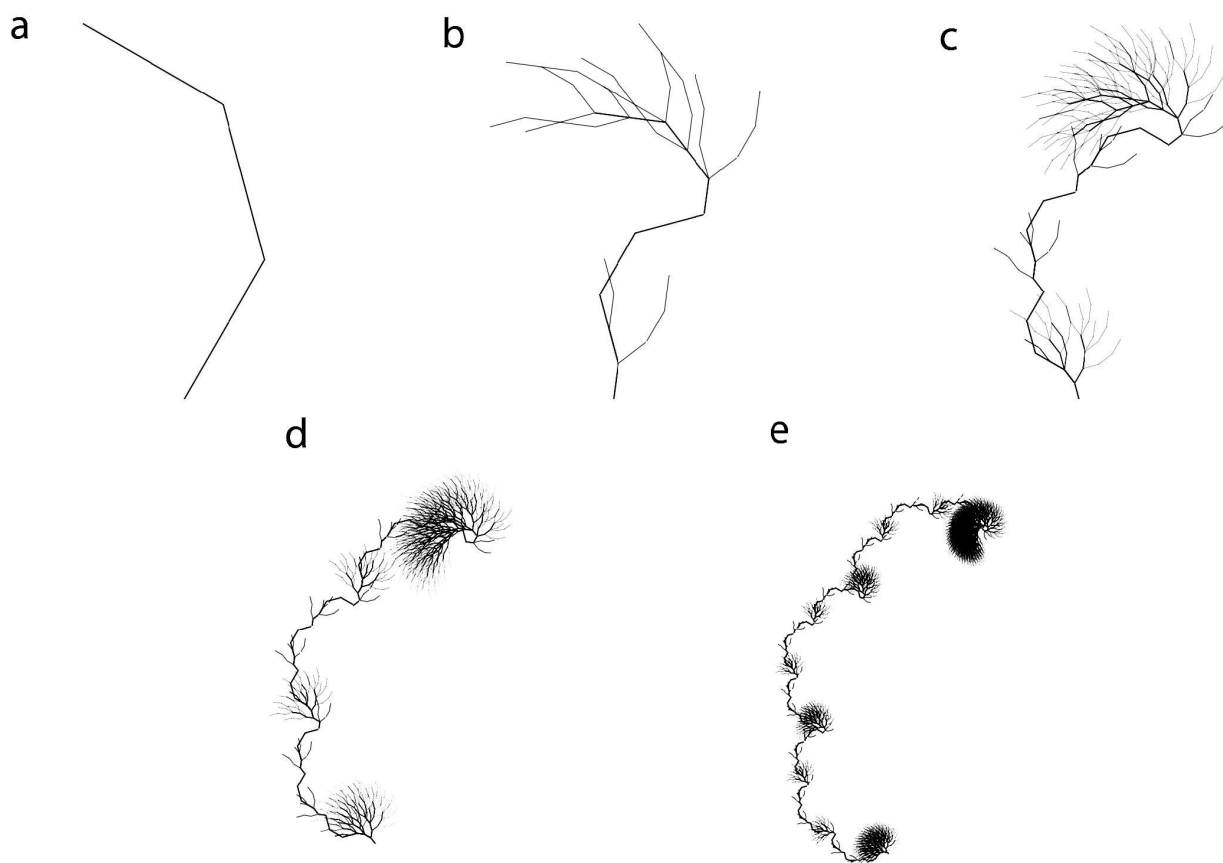
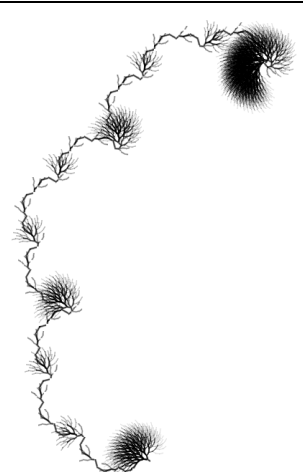


Рис 3. Пять предфракталов последовательно возрастающих порядков (a, b, c, d, e) L-системы «Вегетирующее дерево Серпинского». Программа M-Kokh.

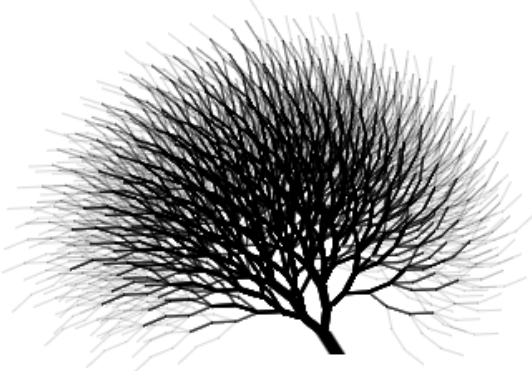
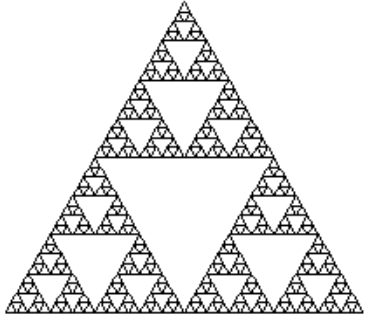
Таблица 4. Характеристика L-системы «Вегетирующие дерево»

<i>Дерево Серпинского</i>	
	
<i>Axiom</i>	<i>FXF--FF--FF</i>
<i>New F</i>	<i>-F[-F+F-F]+[+F-F-F]</i>
<i>New X</i>	<i>--FXF++FXF++FXF--</i>
<i>New Y</i>	<i>-FX-Y</i>

<i>Угол ρ_i</i>	$-1/3$
<i>XY угол ρ_i</i>	$1/8$
<i>Число шагов</i>	4

L-система «Вегетирующее дерево Серпинского» с числом поколений равным 4 возникла в результате «скрещивания» прототипов «Дерево» и «Ковер Серпинского». В аксиому «Дерево» скопировали аксиому «Ковер Серпинского», в качестве New X и New Y так же были взяты данные из «Ковра Серпинского», начальный угол ρ_i изменили с $-1/8$ на $-1/3$, XY угол ρ_i изменили с $1/9$ на $1/8$. Число шагов в полученной L-системе равно 4.

Таблица 5. Характеристики прототипов с характерными картинками

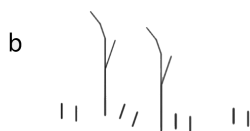
<i>Дерево</i>		<i>Ковер Серпинского</i>
		
<i>Axiom</i>	F	$FXF--FF--FF$
<i>New F</i>	$-F[-F+F-F]+[+F-F-F]$	FF
<i>New X</i>		$--FXF++FXF++FXF--$
<i>New Y</i>		$-FX-Y$
<i>Угол ρ_i</i>	$-1/8$	0
<i>XY угол ρ_i</i>	$1/9$	$1/3$
<i>Число шагов</i>	5	5

За основу L-системы «Зарастающий склон» был взят фрактал «Ветка», которая была модифицирована для роста с наклоном. После удачного формирования растения, появилась задача показать размножение данного растения на поверхности. Для чего была создана начальная форма композиции, и с каждым последующем циклом было увеличено количество растений, каждое из которых начинало новый рост. Далее было сформировано наклонное поле, и растения размножались по наклонной поверхности.

В результате получилась модель роста растений на склоне.



Первый шаг генерации L-системы «Зарастающий склон»



Второй шаг генерации L-системы «Зарастающий склон»



Третий шаг генерации L-системы «Зарастающий склон»



Четвертый шаг генерации L-системы «Зарастающий склон»



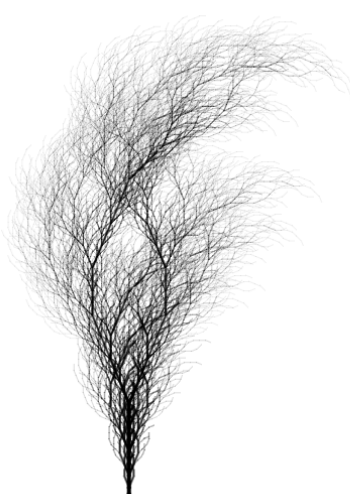
Пятый шаг генерации L-системы «Зарастающий склон»

Рис. 4. Пять предфракталов последовательно возрастающих порядков (a, b, c, d, e) L-системы «Зарастающий склон». Программа M-Kokh.

Таблица 6. Характеристики L-системы «Зарастающий склон»

Axiom:	++++B[----F]+B[-----F]-BB
New F:	FFF[FF-F-F+X][+F+Y-F]
New X:	FF[F-YY+X][+F]
New Y:	F[-F]F[+F]
New B:	B[----F]+B[-----F]-BB
XY угол pi:	1/9
Число шагов:	4

Таблица 7. Характеристики прототипа с характерной картинкой.

<i>Ветка</i>	
	
<i>Axiom</i>	<i>F</i>
<i>New F</i>	<i>FF[-FF+F+FF+F][+FF-F-F]</i>
<i>Угол pi</i>	<i>-1/2</i>
<i>XY угол pi</i>	<i>1/8</i>
<i>Число шагов</i>	<i>4</i>

Литература

1. Komarov A. S., Palenova M. M., Smirnova O. V. // The concept of discrete description of plant ontogenesis and cellular automata models of plant populations / Ecological Modelling. - 2003. - Т. 170. - №2-3. - С. 427-439.
2. Langton C. G. // Studying Artificial Life with Cellular Automata / Physica D. - 1986. - Т. 22. - №1-3. - С. 120-149.
3. Beloussov L. V., Grabovsky V. I. // Morphomechanics: goals, basic experiments and models / Int J Dev Biol. - 2006. - Т. 50. - №2-3. - С. 81-92.
4. Beloussov L. V., Grabovsky V. I. // Information about a form (on the dynamic laws of morphogenesis) / Biosystems. - 2007. - Т. 87. - №2-3. - С. 204-214.

5. *Lindenmayer A.* // Mathematical models for cellular interactions in development. II. Simple and branching filaments with two-sided inputs / *J Theor Biol.* - 1968. - T. 18. - №3. - C. 300-315.
6. *Chomsky N.* // Aspects of the theory of syntax - Cambridge, : M.I.T. Press, 1965.
7. *Mandelbrot B. B., Novak M. M.* // Thinking in patterns : fractals and related phenomena in nature / - River Edge, N.J.: World Scientific, 2004.