

**Моделирование**

УДК 910.1:531.3:574.9

DOI:10.31857/S2500-2627-2020-1-62-65

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУКЦЕССИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В АГРОЭКОЛОГИИ****А.Н. Салугин, доктор сельскохозяйственных наук**

*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций  
и защитного лесоразведения Российской академии наук,  
400062, Волгоград, Университетский пр., 97  
E-mail: saluginan@mail.ru*

*С помощью численного динамического моделирования в виде обыкновенных дифференциальных уравнений получены временные зависимости проективных покрытий для различных экотопов почвенных растительных сообществ на пастбищах аридных зон. Модели разработаны для динамики функционирования четырех типов фитоценозов с различными схемами взаимодействий. Разнообразие схем сукцессионных переходов обусловлено биологическим разнообразием и определяет механизмы процессов самоорганизации почвенных растительных экосистем. Взаимодействие между экотопами в динамических моделях описывается матрицей взаимных сукцессионных переходов между ними. Разработана методика вычислительного эксперимента для построения эволюции подобных переходов и выявления точек бифуркаций. Обнаружена зависимость эволюционных процессов от сложности внутренних связей в экосистеме. Показано, что способность пастбищных растительных сообществ к самовосстановлению связана с разнообразием их фитоценозов. Сформулированы синергетические положения совместного развития фитоценозов в режиме сукцессионных переходов.*

**NUMERICAL MODELING OF SUCCESSIONAL TRANSITIONS IN AGROECOLOGY****Salugin A.N.**

*The Federal Research Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation  
and Protective Forestry of the Russian Academy of Science,  
400062, Volgograd, Universitetskij prp., 97  
E-mail: saluginan@mail.ru*

*Time dependences of projective coatings for different ecotopes of soil plant communities on pastures of arid zones are obtained by numerical dynamic modeling in the form of ordinary differential equations. The models are developed for the dynamics of the functioning of four types of phytocenoses with different interaction schemes. The variety of schemes of succession transitions is caused by biological diversity and determines the mechanisms of self-organization of soil plant ecosystems. The interaction between ecotopes in dynamic models is described by a matrix of mutual successional transitions between them. A computational experiment technique is developed to construct the evolution of such transitions and identify bifurcation points. The dependence of evolutionary processes on the complexity of internal connections in the ecosystem was found. It is shown that the ability of pasture plant communities to self-recovery is associated with the diversity of their phytocenoses. Synergetic provisions of joint development of phytocenoses in the regime of succession transitions are formulated.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, обыкновенные дифференциальные уравнения, растительные сообщества, экотопы, эволюция, точка бифуркации, синергетика

**Key words:** numerical simulation, ordinary differential equations, plant communities, ecotops, evolution, bifurcation point, synergetics

Периодические изменения климата и нагрузок на почвенный покров при изменении животного населения приводят к смене состояний растительных ценозов [1]. Антропогенные воздействия на экосистему: выруб-ка лесов, выжигание кустарников, перевыпас пастбищ обуславливают деградацию почвенного растительного покрова и в результате опустынивание [2]. Подобные явления существенно изменяют естественную динамику растительных сообществ, находящихся в динамическом равновесии с биосферой. Взаимодействие между экотопами фитоценозов в процессе эволюции подчинено законам биогеоценозов. При этом их разрушение и восстановление протекают по механизму сукцессий [3]. Была разработана методика вычислительного эксперимента применительно к системам подобного типа на основе аналитических моделей с использованием ОДУ (обыкновенных дифференциальных уравнений) [4]. Эволюция экосистем, представляющая собой про-

цессы, протекающие в течение длительных интервалов (10–100 лет), отражается на компьютере за секунды. Непосредственная визуализация результатов в интерактивном режиме дает возможность направлять вычисления в нужном направлении, что значительно ускоряет достижение цели моделирования. Для выявления причин деградации и определения факторов, влияющих на ее динамику, последовательно изучено несколько вариантов моделей, отличающихся друг от друга схемами взаимодействий между экотопами.

**Методика.** Сукцессионные переходы и их динамика были изучены нами ранее в работах [2, 4–6] методом марковских цепей с дискретными переходами (дискретное время). В настоящей работе использовали технологию непрерывного моделирования с применением дифференциальных уравнений [7,8].

Были рассмотрены сукцессионные переходы между четырьмя экотопами по схеме, представленной на рис. 1а.

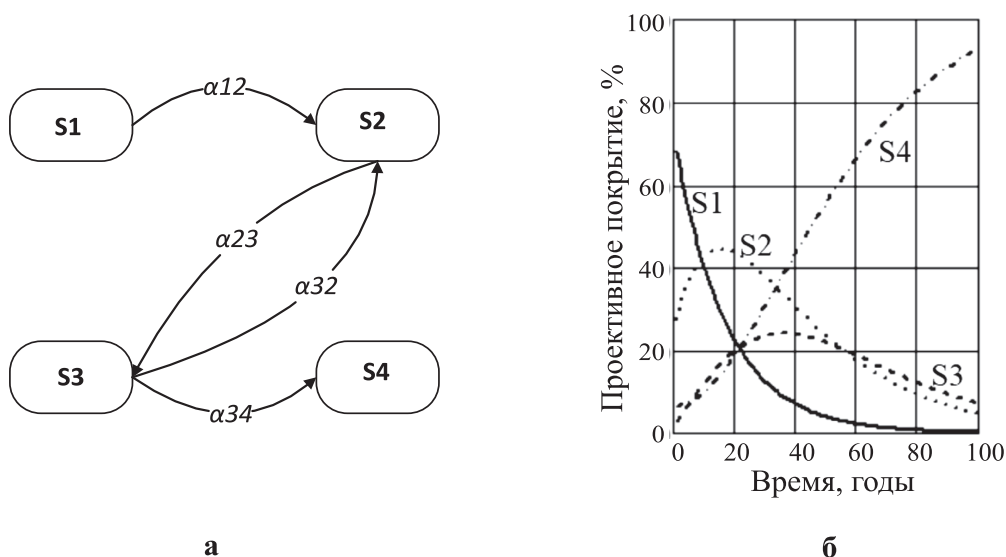


Рис. 1. Ориентированный граф переходов – а и численное решение математической модели (1) с прямыми переходами (разрушение) между элементами  $S_1, S_2, S_3$  и  $S_4$  и обратными (восстановление) – для  $S_2$  и  $S_3$  – б.

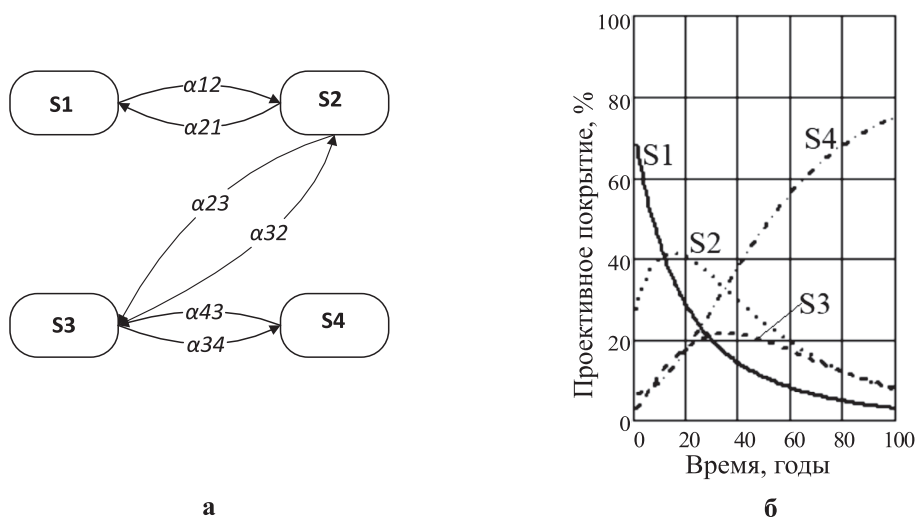


Рис. 2. Ориентированный граф модели (2) – а и ее численное решение – б. Включены обратные переходы между смежными экотопами для  $S_1$  и  $S_2$ .

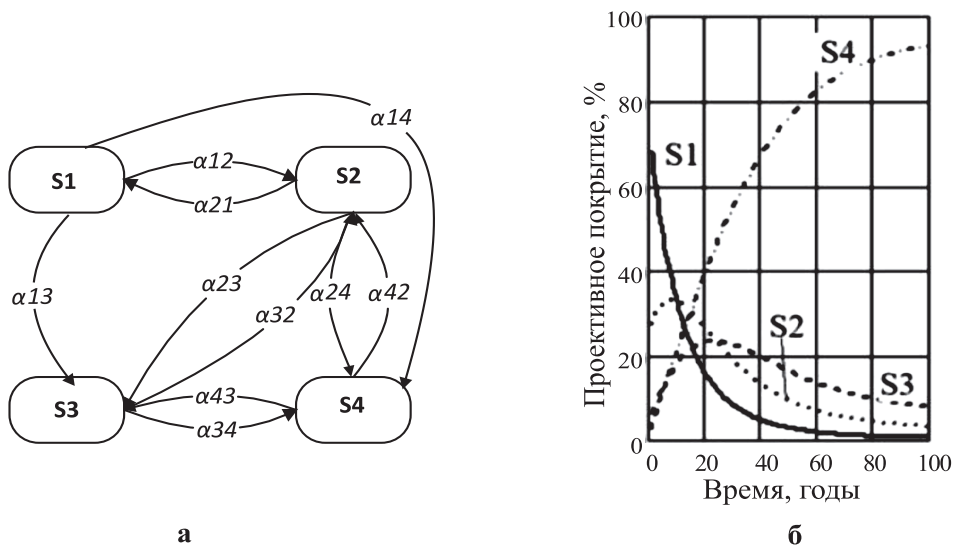


Рис. 3. Ориентированный граф модели (3) с десятью переходами – а и численное решение математической модели – б.

Процесс деградации идет от 1-го к 4-му фитоценозам, в то время как промежуточные обмениваются проективными покрытиями по сукцессионному механизму. Система ОДУ для этой схемы имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = -\alpha_{12} S_1 \\ \frac{dS_2}{dt} = \alpha_{12} S_1 - \alpha_{23} S_2 + \alpha_{32} S_3 \\ \frac{dS_3}{dt} = \alpha_{23} S_2 - (\alpha_{32} + \alpha_{34}) S_3 \\ \frac{dS_4}{dt} = \alpha_{34} S_3, \end{cases} \quad (1)$$

где  $S_i$  – проективные площади экотопов,  $\alpha_{ij}$  – интенсивности сукцессионных переходов.

Модель (1) – математическое описание динамики четырех экотопов во времени. Вектор начальных значений ( $S$ ) проективных покрытий и матрица переходов ( $\alpha_{ij}$ ) служили исходными данными для задачи Коши [8,9]:

$$S = \begin{pmatrix} 68.3 \\ 27.3 \\ 2.9 \\ 1.5 \end{pmatrix} \quad \alpha_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0.116 & 0.046 & 0.017 \\ 0.026 & 0 & 0.076 & 0.039 \\ 0 & 0.009 & 0 & 0.107 \\ 0 & 0.003 & 0.005 & 0 \end{pmatrix} \quad (1a)$$

Модель решали численно методом конечных разностей при известных начальных условиях и коэффициентах переходов [2]. Начальные условия вводили в виде вектора с компонентами проективных покрытий для исходных растительных сообществ пастбищ ( $S_1$ ) деградированных финальных состояний в виде опустыненных территорий ( $S_4$ ) [6]. Из рис. 1 б видно, что  $S_1$  и  $S_4$  – монотонные кривые, в то время как  $S_2$  и  $S_3$  имеют максимумы. В природе сукцессии возникают в тех случаях, когда изменяются условия произрастания для растительных сообществ и они переходят в другой биотический вид [1-3, 9].

В настоящей работе сделана попытка выявить закономерности сукцессий пастбищных экотопов по положению экстремумов  $S_2$  и  $S_3$ , сравнивая их в моделях с разным числом связей. Необратимое и всевозрастающее разрушение растительности, полученное в модели (1), объясняется отсутствием восстановительных переходов для финального состояния (экотоп  $S_4$ ). Для более детальной картины дефляции в модели учтено восстановление экотопов  $S_1$  и  $S_4$  по схеме, приведенной на рис. 2.

В данном варианте учтены прямые и обратные переходы; для смежных экотопов система приобретает вид:

$$\begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = -a_{12} S_1 + a_{21} S_2 \\ \frac{dS_2}{dt} = a_{12} S_1 - (a_{23} + a_{21}) S_2 + a_{32} S_3 \\ \frac{dS_3}{dt} = a_{23} S_2 - (a_{34} + a_{32}) S_3 + a_{43} S_4 \\ \frac{dS_4}{dt} = a_{34} S_3 - a_{43} S_4. \end{cases} \quad (2)$$

Для  $S_1$  и  $S_4$  добавлены восстановительные переходы с коэффициентами  $a_{21}$  и  $a_{43}$ . Графически это решение представлено на рис. 2 б. Сравнивая результаты моделей (1) и (2), отметим их различие:  $S_4$  модели (2) асимптотически стремится к насыщению, что, на наш взгляд, связано с увеличением числа связей в схемах взаимодействия фитоценозов.

Рассмотрим более общую схему вида (рис. 3) для модели (3). В этом случае учтены все связи, которые были определены из дистанционных наблюдений [4]:

$$\begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = -(\alpha_{12} + \alpha_{13} + \alpha_{14}) S_1 + \alpha_{21} S_2 \\ \frac{dS_2}{dt} = \alpha_{12} S_1 - (\alpha_{23} + \alpha_{21} + \alpha_{24}) S_2 + \alpha_{32} S_3 + \alpha_{42} S_4 \\ \frac{dS_3}{dt} = \alpha_{13} S_1 + \alpha_{23} S_2 - (\alpha_{34} + \alpha_{32}) S_3 + \alpha_{43} S_4 \\ \frac{dS_4}{dt} = \alpha_{14} S_1 + \alpha_{24} S_2 + \alpha_{34} S_3 - (\alpha_{42} + \alpha_{43}) S_4. \end{cases} \quad (3)$$

Решение (3) графически представлено на рис. 3 б. Наблюдается четкое насыщение результатов деградации, в то время как исходный экотоп практически уничтожен. Промежуточные виды  $S_2$  и  $S_3$  описываются кривыми с ярко выраженными максимумами.

**Результаты и обсуждение.** Рассмотрим некоторые детали модельных уравнений. Первое уравнение

$$\frac{dS_1}{dt} = -\alpha_{12} S_1 + \alpha_{21} S_2$$

описывает взаимодействие между первым  $S_1$  и вторым  $S_2$  видами фитоценозов по следующему механизму: с интенсивностью  $\alpha_{12}$   $S_1$  «передает» пространственные ресурсы (знак у коэффициента  $\alpha_{12}$  отрицательный) экотопу  $S_2$ ,  $S_2$  «возвращает» часть проективной площади экотопу  $S_1$  с интенсивностью  $\alpha_{21}$  (знак положительный).

Для дефляции это означает, что разрушение  $S_1$  протекает с коэффициентом деградации  $\alpha_{12}$ , а восстановление – с коэффициентом  $\alpha_{21}$ . Более развитой схемой взаимодействий обладают растительные сообщества экотопов  $S_2$  и  $S_3$ , которые имеют степень инцидентности (число связей с другими экотопами), равную четырем. В этом случае для процессов дефляции и восстановления реализуется возможность более свободного и динамичного их поведения: по четырем каналам протекают их разрушение и восстановление с соответствующими интенсивностями. Дифференциальные соотношения между  $S_3$  и  $S_4$  были получены аналогично.

Вычислительные эксперименты на динамических моделях указывают на то, что жизненный цикл растительности на почвах аридных пастбищ обусловлен сукцессионными переходами. При этом важно знать поведение точек бифуркаций в динамике промежуточных экотопов. Движение растительных сообществ к устойчивому динамическому развитию самоорганизации определяется их биоразнообразием, в рассматриваемом случае – экотопами  $S_2$  и  $S_3$ , поведение которых существенно влияет на самовосстановление. Эти два вида растительных сообществ являются своеобразными переносчиками от исходного состояния почвенно-растительной системы к конечному. Для более точного описания процесса мы провели графический

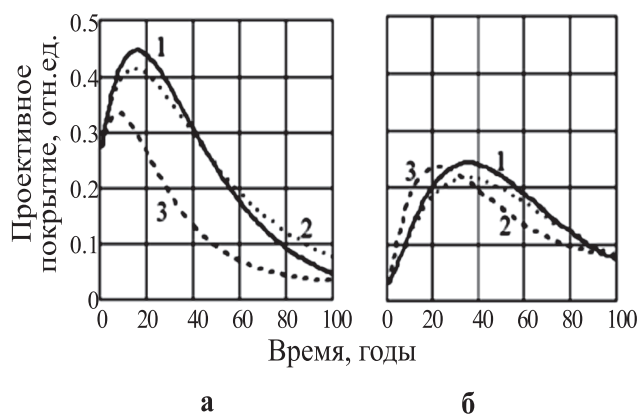


Рис. 4. Эволюция промежуточных экотопов:  
а –  $S_2$  и б –  $S_3$ .  
Номера кривых соответствуют номерам моделей.

анализ моделей с учетом различного числа взаимных переходов в сукцессиях промежуточных экотопов. На рис. 4 четко видно смещение точек бифуркаций в направлении убывания времени их наступления. Причина такого явления связана с тем, что при увеличении степени свободы экосистемы динамика процессов становится более интенсивной.

Смещение максимумов влево по времени для промежуточных экотопов обусловлено изменением числа связей в орграфе структуры модели. Такое смещение можно связать с пространственным биоразнообразием внутри проективного покрытия экотопов. Тогда становится очевидным ускорение процессов деградации по сукцессионному механизму: чем больше связей, тем интенсивнее процесс. При этом степень инцидентности ориентированного графа сукцессий ассоциируется с биоразнообразием. Когда полностью произойдет распад экосистемы, число экотопов уменьшится до одного – останется лишь  $S_4$ ; резко изменится число растительных видов (биоразнообразие уменьшится) и процесс остановится. Для восстановления растительности (обратные сукцессионные переходы) потребуются новые условия (климатические, антропогенные, фитомелиоративные и другие). Используемая в моделях матрица переходов отражает сукцессионные процессы разрушения: интенсивность прямых (разрушительных) переходов выше, чем восстановительных. Синергетические аспекты самоорганизации экосистем требуют следующие решения ОДУ: их характеристические уравнения должны иметь положительные действительные части корней [5]. Таким образом, аналитические модели в виде ОДУ позволяют перевести проблему синергетической устойчивости и самоорганизации экосистем [12-16] в математическую задачу устойчивости решений дифференциальных уравнений [10]. Задачи синергетики растительных сообществ можно решить на основе их биоразнообразия с использованием математического моделирования. Численные эксперименты в нескольких вариантах связей между различными видами биоценозов на пространстве их проективных покрытий качественно различаются в эволюции. Количественные определения параметров устойчивости через коэффициенты переходов  $a_{ij}$  и  $a_{ji}$  требуют более детальной математической теории [11-13]. При изуче-

нии динамики дефляции фитоценозов на пастбищах не менее значим учет антропогенного воздействия, приводящего к потере их способности к самовосстановлению. Для выявления условий функционирования экосистем с самовосстановлением необходимо перейти от задач устойчивости к синергетической самоорганизации, представляющей более сложную проблему составления математического образа экосистемы с обострением [12].

#### Литература

1. Виноградов Б.В. Основы ландшафтной экологии. – М.: ГЕОС, 1998. – 418 с.
2. Салугин А.Н. Динамическое моделирование деградиционных процессов в агроэкологии. Диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук. – Волгоград, 2006.
3. Миркин Б.М., Наумова Л.Г., Соломец А.И. Современная наука о растительности: учебник. – М.: Логос, 2002. – 264 с.
4. Кулик К.Н., Салугин А.Н. Марковские цепи дефляции почвенно-растительного покрова пастбищ Черных земель. // Доклады Россельхозакадемии. 2003. – N5. С. 34-37.
5. Кулик К.Н., Салугин А.Н., Сидорова Е.А. Динамическая устойчивость аридных экосистем // Аридные экосистемы. – 2012. – Т. 18, – N2 (51), – С.28-34.
6. Салугин А.Н., Кулик К.Н. Моделирование, прогноз и оптимальное управление в экологии почвенно-растительного покрова Калмыкии // Аридные экосистемы. – 2001. – Т.7. – N 14-15. – С. 11-21.
7. Свирежнев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
8. Салугин А.Н., Кулик К.Н. Математические модели динамики и прогноза эволюции аридных экосистем (монография). – Волгоград, Волгоградское научное издательство, 2006. – 180 с.
9. Jorgensen S.E., Bendricchio G., *Fundamentals of Ecological Modelling, 3rd ed. (Developments in Environmental Modelling, V. 21).* – Amsterdam: Elsevier, 2001. – 530 p.
10. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам; пер. с англ. – М.: Наука, 1986. – 496 с.
11. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
12. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики. Режимы с обострением, самоорганизация, темпомыри. – С.-Пб.: Алетейя, 2002. – 414 с.
13. Самарский А.А., Курдюмов С.П. Парадоксы многовариантного нелинейного мира // Гипотезы и прогнозы. – М.: Знание, 1989. – С. 8-29.
14. Пригожин И. От существующего к возникающему / Под ред. Ю.Л. Климонтовича; пер. с англ. – М.: Наука, 1985. – 327 с.
15. Логофет Д.О., Денисенко Е.А., Голубятников Л.Л., 2005. Сукцессии в лесостепи в условиях изменения климата: модельный подход // Журн. общ. биологии. – 2003. – Т. 66. – № 2. – С.136-145.
16. Logofet D.O., Ulanova N. G., Klochkova I.N., Demidova A.N. Structure and dynamics of a clonal plant population: Classical model results in a non-classic formulation // Ecological Modelling. – 2006. – V. 192. – P. 95-106.

Поступила в редакцию 15.05.19  
После доработки 03.07.19  
Принята к публикации 10.08.19