

ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В СИСТЕМЕ ПОЧВА-РАСТИТЕЛЬНОСТЬ: СРАВНЕНИЕ МИНИМАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА

Рыжова И.М.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
iryzhoval@mail.ru

Аннотация: Обсуждаются результаты сравнения трех минимальных моделей круговорота углерода, различающихся видом нелинейных функций зависимости продуктивности от содержания гумуса в почве. Найден универсальный эффективный параметр системы почва-растительность, определяющий ее качественное поведение. Показано, что ведущую роль на начальном этапе развития экосистемы играет отклик продуктивности на увеличение содержания гумуса в почве.

В последние два десятилетия активно развиваются нелинейные динамические модели биогеохимических циклов. В их основе лежат представления о почве, как сложной системе, устойчивость и гибкая реакция которой на внешние воздействия определяется нелинейными обратными связями между ее компонентами и окружающей средой (Phillips, 1998; Ryzhova, 1998; Смагин и др. 2001; Manzoni et al., 2004). В большинстве этих моделей нелинейные функции использовались при описании разложения органического вещества почв для представления субстрат-микробных взаимодействий, что повысило гибкость моделей в результате учета прайминг-эффекта и механизмов адаптации микроорганизмов к условиям среды. Результаты сравнительного анализа моделей выявили качественные различия в долговременной динамике органического вещества почв в зависимости от выбора описания субстрат-микробных взаимодействий (Wutzler, Reichstein, 2008). Значительно меньше моделей, рассматривающих нелинейные обратные связи в системе почва-растительность (Смагин и др., 2001; Рыжова, 2003). Эти связи играют ведущую роль в динамике наземных экосистем. В процессе формирования системы с ростом продуктивности увеличивается количество поступающих в почву растительных остатков, служащих источником образования гумуса. В свою очередь, гумус оптимизирует среду обитания растений и способствует росту продуктивности растительного покрова. Однако если содержание органического вещества в почве превысит оптимальное, продуктивность начнет снижаться за счет угнетения роста растений, в некоторых случаях до нуля. Таким образом, в ходе развития системы положительная обратная связь может перейти в отрицательную.

Целью нашей работы является сравнительное исследование качественного поведения системы почва-растительность в зависимости от выбора вида функции, описывающей зависимость продуктивности от содержания органического вещества в почве.

Проведено сравнение трех минимальных моделей круговорота углерода вида (1), различающихся только выбором формулировки, отражающей нелинейную обратную связь между почвой и фитоценозом:

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= k_{21}x_2 - k_1x_1 \\ \frac{dx_2}{dt} &= k_0 f^i(x_1) - (k_2 + k_{21})x_2\end{aligned}\tag{1}$$

где x_1 - углерод гумуса; x_2 - углерод детрита; k_1 - константа скорости минерализации гумуса; k_2 - константа скорости минерализации растительных остатков; k_{21} - константа скорости гумификации растительных остатков, k_0 - безразмерный параметр, представляющий долю чистой первичной продукции, которая ежегодно включается в деструкционный цикл, $f^i(x_1)$ - функция, описывающая зависимость продуктивности от содержания гумуса в почве.

Функция $f^1(x_1)$ отражает существенную зависимость продуктивности от гумусированности почвы на ранних стадиях почвообразования и ее ослабление с ростом содержания гумуса по мере приближения системы к стационарному состоянию, когда продуктивность максимальна. Функция $f^2(x_1)$ описывает уменьшение продуктивности при увеличении содержания органического вещества в почве выше оптимального значения. Функция $f^3(x_1)$ характеризуют вариант, когда содержание органического вещества в почве может достигать критического значения, при котором продуктивность падает до нуля. Рассматриваемые функции имеют следующий вид:

$$f^1(x_1) = \frac{p_0 x_1}{a + x_1}, \quad (2)$$

$$f^2(x_1) = \frac{p_0 x_1}{c + x_1^2}, \quad (3)$$

$$f^3(x_1) = p_0 x_1 (b - x_1), \quad (4)$$

где p_0 , a , b и c – параметры моделей.

Проведенное исследование показало, что каждая из моделей имеет два стационарных значения типа устойчивый узел: тривиальное $x_1^i = x_2^i = 0$ и нетривиальное $x_1^i > 0$ и $x_2^i > 0$. Эффективный параметр системы, определяющий переход из одного стационарного состояния в другое, для всех рассмотренных моделей имеет следующий универсальный вид:

$$q = \frac{f_d^i k_{21}}{k_1(k_{21} + k_2)} - 1, \quad (5)$$

где f_d – производная функции $f^i(x_1)$ при $x_1 = 0$.

При $q < 0$ устойчиво тривиальное стационарное состояние, $q = 0$ – точка бифуркации, при $q > 0$ устойчивым становится состояние $x_1^i > 0$, $x_2^i > 0$.

Отсюда следует, что область устойчивого функционирования системы почва растительность определяется неравенством $q > 0$.

Как видно из уравнения (5), в развитии системы ведущую роль играет величина производной f_d , представляющая собой скорость роста продуктивности с увеличением содержания гумуса в почве на начальном этапе формирования биогеоценоза. В работе получены аналитические выражения для x_1^i и x_2^i как функции эффективного параметра и проведено сравнение поведения системы в зависимости от вида функций $f^i(x_1)$.

Литература

- Рыжова И.М. Анализ устойчивости почв на основе теории нелинейных динамических систем // Почвоведение. 2003. №5. С.583-590.
- Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Смагина М.В., Глаголев М.В., Шевченко Е.М., Хайдапова Д.Д., Губер А.К. Моделирование динамики органического вещества почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2001. 120 с.
- Manzoni S., Porporato A., D'Odorico P., Laio F., Rodriguez-Iturbe I. Soil nutrient cycles as a nonlinear dynamical system. // Nonlinear Processes in Geophysics, European Geosciences Union (EGU). 2004. V. 11. № 5/6. P. 589-598.
- Phillips J.D. On the relations between complex systems and the factorial model of soil formation (with discussion and response) // Geoderma. 1998. V. 86. P. 1-43.
- Ryzhova I.M. Analysis of soil-vegetation systems' sensitivity to changes of climate-dependent carbon turnover parameters // Biology and Fertility of Soils. 1998. V.27. P. 263-266.
- Wutzler T., Reichstein M. Colimitation of decomposition by substrate and decomposers a comparison of model formulations // Biogeosciences. 2008. V. 5. P. 749-759.