

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья
УДК 51-76:574.34:574.5

ВЛИЯНИЕ ЗООПЛАНКТОНА НА ЭВОЛЮЦИЮ ФИТОПЛАНКТОНА

В.С. Жданов, В.А. Кан, Г.П. Неверова, О.Л. Жданова
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
ул. Радио 5, г. Владивосток, 690041,
e-mail: vzhdanov@iacp.dvo.ru, kan.va@inbox.ru,
galina.nev@gmail.com, axanka@iacp.dvo.ru

Методами математического моделирования оценивается спектр влияния зоопланктона на динамику обилия фитопланктона. Предложена трехкомпонентная модель сообщества фитопланктон – зоопланктон с дискретным временем, в которой токсичный и нетоксичный виды фитопланктона конкурируют за ресурсы. Взаимодействие зоо- и фитопланктона описывается трофической функцией Холлинга II типа. Ограничение роста биомассы фитопланктона доступностью внешних ресурсов (минерального питания, кислорода, освещенности и т.п.) описывается моделью конкуренции Рикера.

Ключевые слова: динамика сообщества, модель Рикера, фитопланктон, зоопланктон, взаимодействие по принципу «хищник – жертва», конкуренция фитопланктона, мультистабильность.

Образец цитирования: Жданов В.С., Кан В.А., Неверова Г.П., Жданова О.Л. Влияние зоопланктона на эволюцию фитопланктона // Региональные проблемы. 2022. Т. 25, № 3. С. 158–160. DOI: 10.31433/2618-9593-2022-25-3-158-160

В настоящее время активно исследуется феномен «цветения» фитопланктона, выражающийся в резком увеличении его плотности, при этом токсичное цветение негативно влияет на аквакультуру, прибрежный туризм и здоровье человека. Часто для описания эффекта цветения применяются уравнения с запаздыванием, где фитопланктон описывают одним или двумя уравнениями. Аппарат рекуррентных уравнений, широко используемый при моделировании популяций и сообществ [напр., обзоры 1, 2] и позволяющий описывать эффекты запаздывания естественным образом, в данной предметной области практически не применяются. Используя классическую для данной области идеологию построения модели, мы предлагаем дискретную во времени трехкомпонентную модель сообщества фито-зоопланктона. Сообщество включает зоопланктон и два конкурирующих за ресурсы вида фитопланктона: токсичный и нетоксичный.

Известно, что некоторые виды фитопланктона, в том числе диатомовые водоросли, не выделяют токсины, если они не повреждены. Показано, что давление зоопланктона на фитопланктон снижается в присутствии токсичных веществ. Например, *Sorperods* проявляют избирательность при выборе пищи и избегают употреблять фитопланктон, продуцирующий токсины [4]. Учитывая это, будем считать, что зоопланктон (хищник) потребляет только нетоксичный вид фитопланктона (жертва), а токсичный фитопланктон лишь конкурирует за ресурсы с нетоксичным:

$$\begin{cases} x_{n+1} = A x_n \exp(-x_n - \rho y_n \cdot (1 - \frac{\alpha \cdot z(n)}{y^* + y(n)})) \\ y_{n+1} = B \cdot (1 - \frac{\alpha \cdot z(n)}{y^* + y(n)}) \cdot y_n \exp(-\varphi x_n - y_n \cdot \\ \cdot (1 - \frac{\alpha \cdot z(n)}{y^* + y(n)})) \\ z_{n+1} = \frac{w \cdot y(n)}{y^* + y(n)} z_n \exp(-z_n) \end{cases} \quad (1)$$

Здесь x , y и z – относительные численности популяций двух видов фитопланктона и зоопланктона соответственно; α – среднее значение количества жертв (выраженное в относительных единицах), потребляемое одной относительной единицей хищника; y^* – константа полунасыщения хищника; A , B и w – скорости роста видов x , y и z соответственно; ρ и φ – коэффициенты связи конкурирующих за ресурс популяций.

В отсутствие зоопланктона ($z = 0$) модель (1) редуцируется до модели конкуренции двух видов, предложенной в 1972 г. А.П. Шапиро [3] и в 1974 г. Р. Мэем [6]. Детальное исследование этой модели показало [5], что динамика двух конкурирующих за ресурс видов может быть крайне разнообразной и сложной, а также демонстрирует мультистабильность. При сильной межвидовой конкуренции фитопланктона за ресурсы выживание определяется как отношением скоростей воспроизводства, так и начальными условиями. В результате изъятие части фитопланктона зоопланктоном, изменяя текущую численность одного из конкурентов, может привести к тому, что популяция с меньшим репродуктивным потенциалом вытеснит более плодовитого конкурента. В случае слабо выраженной межвидовой конкуренции при достаточно высоких скоростях роста популяций фитопланктона сложно прогнозировать сценарий развития сообщества, хотя виды и будут сосуществовать. Присутствие зоопланктона, изменяя начальные условия, может привести к смене наблюдаемого динамического режима либо фазы колебаний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00243, <https://rscf.ru/project/22-21-00243/>.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Фрисман Е.Я., Кулаков М.П., Ревуцкая О.Л., Жданова О.Л., Неверова Г.П. Основные направления и обзор современного состояния исследований динамики структурированных и взаимодействующих популяций // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. Т. 11, № 1. С. 119–151. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-1-119-151
2. Фрисман Е.Я., Жданова О.Л., Кулаков М.П., Неверова Г.П., Ревуцкая О.Л. Математическое моделирование популяционной динамики на основе рекуррентных уравнений: результаты

и перспективы. Ч. II // Известия РАН. Серия биологическая. 2021. № 3. С. 227–240. DOI: 10.31857/S000233292103005X

3. Шапиро А.П. Дискретная модель конкуренции двух популяций // ДАН СССР. 1974. Т. 218, № 3. С. 699–701.
4. DeMott W.R., Moxter F. Foraging on cyanobacteria by copepods: responses to chemical defenses and resource abundance // Ecology. 1991. Vol. 72. P. 1820–1834.
5. Kulakov M., Neverova G., Frisman E. The Ricker Competition Model of Two Species: Dynamic Modes and Phase Multistability // Mathematics. 2022. Vol. 10, N 7. 1076. DOI: 10.3390/math10071076
6. May R.M. Biological populations with nonoverlapping generations: stable points, stable cycles, and chaos // Science. 1974. Vol. 186, N 4164. P. 645–647.

REFERENCES:

1. Frisman E.Ya., Kulakov M.P., Revutskaya O.L., Zhdanova O.L., Neverova G.P. The key approaches and review of current researches on dynamics of structured and interacting populations. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 119–151 (In Russ.).
2. Frisman E.Ya., Zhdanova O.L., Kulakov M.P., Neverova G.P., Revutskaya O.L. Mathematical Modeling of Population Dynamics Based on Recurrent Equations: Results and Prospects. Part II. *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya*, 2021, no. 3, pp. 227–240. DOI: 10.31857/S000233292103005X (In Russ.).
3. Shapiro A.P. Discrete model of competition between two populations. *DAN SSSR*, 1974, vol. 218, no. 3, pp. 699–701. (In Russ.).
4. DeMott W.R., Moxter F. Foraging on cyanobacteria by copepods: responses to chemical defenses and resource abundance. *Ecology*, 1991, vol. 72, pp. 1820–1834.
5. Kulakov M., Neverova G., Frisman E. The Ricker Competition Model of Two Species: Dynamic Modes and Phase Multistability. *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 7, 1076. DOI: 10.3390/math10071076
6. May R.M. Biological populations with nonoverlapping generations: stable points, stable cycles, and chaos. *Science*, 1974, vol. 186, no. 4164, pp. 645–647.

ZOOPLANKTON EFFECT ON THE PHYTOPLANKTON EVOLUTION

V.S. Zhdanov, V.A. Kan, G.P. Neverova, O.L. Zhdanova

The paper uses methods of mathematical modeling to estimate a zooplankton influence on the dynamics of phytoplankton abundance. We propose a three-component model of the phytoplankton-zooplankton community with discrete time, in which toxic and non-toxic species of phytoplankton compete for resources. We use the Holling functional response of type II to describe interaction between zoo- and phytoplankton. The restriction of phytoplankton biomass growth by the availability of external resources (mineral nutrition, oxygen, light, etc.) is described by the Ricker competition model.

Keywords: *community dynamics, Ricker's model, phytoplankton, zooplankton, predator-prey interaction, competing phytoplankton populations, multistability.*

Reference: Zhdanov V.S., Kan V.A., Neverova G.P., Zhdanova O.L. Zooplankton effect on the phytoplankton evolution. *Regional'nye problemy*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 158–160. (In Russ.). DOI: 10.31433/2618-9593-2022-25-3-158-160

Поступила в редакцию 19.04.2022

Принята к публикации 15.09.2022