

Ableitung von Adaptationsstrategien der Landwirtschaft an veränderte Klimabedingungen (AGROKLIM-ADAPT); Teilprojekt 6 (DSS); Schlußbericht; 51 S und 133 S. (in 14 Anlagen.); Müncheberg (Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung).

16. Wenkel K.-O., Mirschel W., Berg M., Wieland R., Köster B. (2011) Experience from the Use of the Interactive Model- and GIS-based Information and Decision Support System LandCaRe-DSS for the Development of Economic Effective Application Strategies of Agriculture to Climate Change. In: Salapasis M., Matopoulos, A. (eds.): HAICTA 2011 – 5th International Conference on Information Technologies in Agriculture, Food and Environment (8-11 September, 2011, Skiathos, Greece), Volume I, HAICTA – Branch of Northern and Central Greece, p. 129-140.

**УДК 51-76+574.34+574.5**

### **Особенности влияния зоопланктона на динамику фитопланктона**

***Г.П. Неверова, О.Л. Жданова, Е.А. Колбина,  
А.И. Абакумов***

*ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток*

Важнейшей подсистемой водных экосистем является пелагиаль, в которой функционируют специфические сообщества, не имеющие аналогов в наземных экосистемах [1]. Фитопланктон – нижний трофический уровень водной экосистемы, его функционирование обеспечивает жизнедеятельность всей экосистемы. Межвидовые взаимодействия в фитопланктонном сообществе играют существенную роль в его жизнедеятельности [2]. В то же время существенное воздействие на динамику обилия фитопланктона оказывает зоопланктон, который, в свою очередь, является кормовой базой для многих видов рыб. Зоопланктон также является многовидовым сообществом, в котором, как правило, выделяются следующие группы беспозвоночных: коловратки (Rotatoria), ветвистоусые раки (Cladocera), веслоногие раки (Copepoda) [3].

Ключевые особенности развития сообщества фито- и зоопланктона с учетом внутри и межвидового взаимодействия можно описать при помощи следующей схемы (рисунок 1).

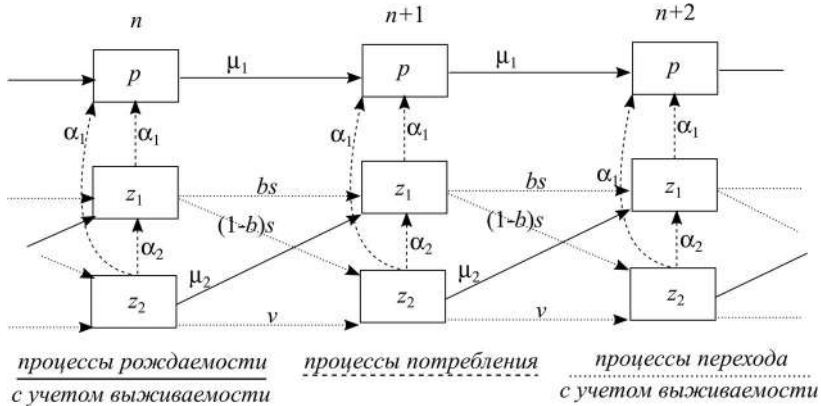


Рисунок - 1 Ключевые особенности развития сообщества фито- и зоопланктона с учетом внутри- и межвидового взаимодействия

На схеме 1  $n$  соответствует номеру суток,  $p$  – плотность фитопланктона,  $z_1$  – плотность ювенильной (неполовозрелой) группы зоопланктона,  $z_2$  – плотность половозрелой группы зоопланктона.  $\mu_i$  и  $\alpha_i$  – удельная скорость роста и интенсивность потребления  $i$ -ой группы видов сообщества, соответственно (1 – фитопланктон, 2 – зоопланктон);  $b$  – коэффициент, характеризующий долю ювенильного зоопланктона, остающегося в этой же группе,  $s$  – выживаемость ювенильной группы зоопланктона в зависимости от обилия питания;  $v$  – коэффициент выживаемости зрелого зоопланктона.

С учетом процессов рождаемости, смертности и саморегуляции, а также особенностей взаимодействия фито- и зоопланктона, представленных на рисунке 1, динамика сообщества может быть формализована следующим образом:

$$\begin{cases} p(n+1) = \mu_1 \exp(-p(n)) \cdot p(n) - \alpha_1(p(n), z_1(n)), \\ z_1(n+1) = \mu_2 z_2(n) + b \cdot s(p(n)) \cdot z_1(n) - \alpha_2(z_1(n), z_2(n)), \\ z_2(n+1) = (1-b) \cdot s(p(n)) \cdot z_1(n) + v z_2(n). \end{cases} \quad (1)$$

Для описания зоопланктонного сообщества мы используем две скалярные переменные, т.к. зоопланктон принципиально разнороден, но не по видовому признаку, а по признаку воспроизводства и питания. Следовательно, зоопланктонные организмы можно разделить на две стадии развития: ювенильную и половозрелую. По характеру питания зоопланктон разделен на два класса: нехищный и хищный [4]. К нехищному относится молодь всех популяций зоопланктона. В свою очередь зрелая группа зоопланктона включает нехищных половозрелых особей

кладоцер, питающихся водорослями, и хищных особей копепоид и коло-враток. Плотностная регуляция зоопланктона осуществляется неявно на ювенильной стадии в результате конкуренции за питание. В модели (1) процессы взаимодействия зоо- и фитопланктона в явном виде учтены в выживаемостях на ранних стадиях жизненного цикла зоопланктона.

Для описания взаимодействия видов, а именно изменения численностей популяций и их частей, составляющих сообщество, в результате поедания, предлагается использовать трофическую функцию Холлинга II типа [5, 6], учитывающую насыщение хищника. Следовательно, процесс выживаемости ювенильных особей зоопланктона может быть опи-сан следующей функцией  $s(p(n)) = \frac{s \cdot p(n)}{p^* + p(n)}$ , где  $s$  – максимально воз-

можная выживаемость ювенильных особей зоопланктона в условиях неограниченных пищевых ресурсов. Процесс суммарного потребления фитопланктона зоопланктоном всех рассматриваемых групп предпола-гается описывать функцией вида  $\alpha_1(p(n), z_1(n)) = \frac{\alpha_1(z_1(n) + z_2(n))p(n)}{p^* + p(n)}$ .

Каннибализм внутри зоопланктона, в процессе которого зрелые особи некоторых видов зоопланктона поедают ювенильных, предлагается формализовать следующим образом:  $\alpha_2(z_1(n), z_2(n)) = \frac{\alpha_2 z_1(n) z_2(n)}{z_1^* + z_1(n)}$ .

В рамках выбранных обозначений  $p^*$  – константа полунасыщения зоопланктона,  $\alpha_1$  – средняя плотность биомассы фитопланктона, потре-бляемая единицей плотности зоопланктона,  $z_1^*$  – константа полуна-сыщения зрелого зоопланктона ювенильным,  $\alpha_2$  – средняя плотность биомассы ювенильной группы зоопланктона, потребляемая единицей плотности зрелой части зоопланктона.

Проанализированы сценарии перехода от стационарной динамики к колебаниям численности фито- и зоопланктона при различных значе-ниях внутривидовых параметров, определяющих характер дина-мики каждого из составляющих сообщество видов, и параметров их вза-имодействия. Основное внимание уделено изучению огромного разно-образия сложной динамики сообщества. Происходит усложнение дина-мики фитопланктона через серию бифуркаций удвоения периода. С по-явлением зоопланктона каскад бифуркаций удвоения периода у фито-планктона и сообщества в целом реализуется раньше (при более низких скоростях воспроизводства клеток фитопланктона), чем в случае, когда фитопланктон развивается изолированно. Вариация уровня канниба-лизма зоопланктона способна значительно изменить как существующий

в сообществе режим динамики, так и его бифуркацию. При определенной структуре пищевых отношений зоопланктона возможна реализация сценария Неймарка-Сакера в сообществе. Возможны существенные изменения динамического режима в сообществе: резкие переходы от регулярной к квазипериодической динамике (по сценарию Неймарка-Сакера) и далее к точным циклам с небольшим периодом (обратная реализация каскада удвоения периода).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00213.*

### **Библиографический список**

1. Винберг Г.Г. Особенности водных экологических систем // Журнал общей биологии. – 1967. - Т. 28, № 5. – С. 538–545.
2. Абакумов А.И., Пак С.Я. Сосуществование видов в микробном сообществе. Модельное исследование // Информатика и системы управления. – 2012, № 3(33), с. 15–24.
3. Фефилова Е.Б. Изученность и видовое разнообразие зоопланктона водоемов северо-востока европейской части России // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. – 1999. – № 24. URL: <http://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/99-24/09.html>.
4. Дулепова Е.П. Сравнительная биопродуктивность макро-экосистем дальневосточных морей. – Владивосток: ТИНРО-центр. 2002.
5. Базыкин А.Д. Математическая биофизика взаимодействующих популяций. – М.: Наука. 1985.
6. Фрисман Е.Я., Кулаков М.П., Ревуцкая О.Л., Жданова О.Л., Неворова 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.