



УДК 51-76+574.5

© 2014 г. **Е.Е. Гиричева**, канд. физ.-мат. наук
(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В СИСТЕМЕ "ХИЩНИК – ЖЕРТВА" НА ПРИМЕРЕ ПЛАНКТОННОГО СООБЩЕСТВА*

Рассматривается модель планктонного сообщества с учетом внутритрофического хищничества. В работе исследуются вопросы существования положительных равновесий и их устойчивость под влиянием межпопуляционных и внутривидовых взаимодействий.

Ключевые слова: математическое моделирование, внутривидовые взаимодействия, равновесия, устойчивость.

Введение

Для описания взаимодействия популяций планктонного сообщества используются классические модели типа "хищник – жертва". Так как экосистемы могут включать сотни видов, это описание невозможно сделать точным. А при объединении нескольких видов в одну группу, рассматриваемую как единое целое, возникают внутривидовые взаимодействия.

В NPZ-моделях (питательное вещество – фитопланктон – зоопланктон) зоопланктон представляет собой достаточно разнородную группу. В нее входят как виды, отличающиеся размером, типом питания и другими характеристиками, так и виды, схожие по этим параметрам. Эти факторы и определяют тип внутривидовых взаимодействий. Схожие виды конкурируют за имеющийся ресурс (фитопланктон), этот тип взаимодействия обычно отражается в типе трофической функции: она зависит не только от количества жертв, но и от количества хищников [1]. Также внутривидовые взаимодействия хищников можно описать в виде плотностно-зависимой смертности [2 – 4]: $M(Z) = mZ + qZ^{\gamma}$. Первый член трактуется как естественная смертность, а второе слагаемое – как самоограничение популяции, или как внутривидовое хищничество (например, выедание травоядных видов зоопланктона хищными видами), или как выедание зоопланктона представителями высших трофических уровней (рыбами).

Влиянию внутривидовых взаимодействий на поведение всей системы только в последнее время начали уделять внимание [5, 6]. Работа Polis [7] инициировала обсуждение важной роли механизма каннибализма в популяцион-

* Работа выполнена при поддержке комплексной программы фундаментальных исследований Дальневосточного отделения РАН "Дальний Восток", проекты 2.10 и 5.1.5.

ной динамике. В работах [4, 8] было проведено численное исследование механизма внутривидового хищничества, результатом которого стал вывод, что этот тип взаимодействия увеличивает равновесное значение жертв и стабилизирует равновесное состояние, когда интенсивность взаимодействия невелика.

Авторами Jang и Baglama [9, 10] вопрос внутритрофического хищничества рассматривался на примере моделей планктонного сообщества, включающих разные способы описания механизма этих взаимодействий, в том числе и в виде плотностно-зависимой смертности [11]. Ими было показано, что внутритрофическое хищничество влияет на динамику модели, если средние приросты продукции фито- и зоопланктона положительны. Одним из выводов исследований авторов [2, 4, 11] стал тот факт, что внутривидовые взаимодействия оказывают стабилизирующее действие на систему. Даже при небольшой интенсивности взаимодействий система от хаотической динамики переходит к устойчивому режиму.

В настоящей работе представлена модель, включающая механизм внутривидового хищничества, описываемый квадратичным членом в функции смертности: $M(Z) = mZ + qZ^2$. В работах [2, 3, 12] использовалось подобное описание, однако для данных моделей только численно показано существование положительных равновесий. Еще один вопрос, который нас интересует, – какова связь удельных скоростей роста фито- и зоопланктона и влияния внутривидового хищничества на поведение системы. Цель работы – исследовать эту связь и изучить вопрос: насколько интенсивность воспроизводства жертв и хищников влияет на стабилизирующее свойство внутривидового хищничества.

Описание модели

Для описания взаимодействия фитопланктона (P) и зоопланктона (Z) с учетом питательных веществ (N) в физически однородном верхнем перемешанном слое воды используем трехкомпонентную модель. Изменение концентрации питательных веществ происходит за счет потоков биогенов в рассматриваемую область и из нее, реминерализации отмершей органики и участия в фотосинтезе. Увеличение биомассы фитопланктона происходит в процессе фотосинтеза при участии биогенов, а убыль – в результате выедания зоопланктоном, естественной смертности и вымывания. Биомасса зоопланктона растет за счет трофических взаимодействий с фитопланктоном и убывает из-за естественной смертности, вымывания и внутривидовых взаимодействий.

Динамику биомассы компонент опишем системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = F_N(N, P, Z) = Q_1(N_0 - N) + \beta(m_P P + m_Z Z + \delta Z^2) - \frac{\mu_P N}{K_N + N} P, \\ \frac{dP}{dt} = F_P(N, P, Z) = \frac{\mu_P N}{K_N + N} P - \frac{\mu_Z P}{K_P + P} Z - (m_P + Q_2)P, \\ \frac{dZ}{dt} = F_Z(N, P, Z) = \frac{\alpha \mu_Z P}{K_P + P} Z - \delta Z^2 - (m_Z + Q_3)Z. \end{cases} \quad (1)$$

Все параметры системы положительны и имеют следующий экологический смысл: μ_P – максимальная скорость роста фитопланктона; K_N – константа полунасыщения фитопланктона по биогенам; β – коэффициент реминерализации мертвой органики, ($\beta < 1$); m_P – удельная смертность фитопланктона, ($m_P < 1$); μ_Z – максимальная скорость выедания зоопланктоном фитопланктона; K_P – константа полунасыщения зоопланктона по фитопланктону; α – эффективность питания зоопланктона, ($\alpha < 1$); m_Z – удельная смертность зоопланктона, ($m_Z < 1$); δ – интенсивность внутривидовых взаимодействий зоопланктона ($\delta < 1$); Q_1, Q_2, Q_3 – скорости вымывания, ($Q_i < 1$); N_0 – концентрация биогенов вне рассматриваемой области.

Существование равновесных значений

С биологической точки зрения представляют интерес равновесные положительные значения компонент. Поэтому решения системы

$$\begin{cases} F_N(N, P, Z) = 0, \\ F_P(N, P, Z) = 0, \\ F_Z(N, P, Z) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

имеющие нулевые компоненты, мы не рассматриваем. Необходимым условием существования положительных равновесий является ограничение на удельные скорости роста фитопланктона и зоопланктона:

$$\mu_P > m_P + Q_2, \quad \mu_Z > \frac{Q_3 + m_Z}{\alpha}. \quad (3)$$

Выражаем из второго и третьего уравнения P и N через Z :

$$P^* = P(Z) = \frac{P_1(Z)}{P_2(Z)} = \frac{K_P(m_Z + Q_3 + \delta Z)}{\alpha\mu_Z - (m_Z + Q_3 + \delta Z)}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} N^* = N(Z) &= \frac{N_1(Z)}{N_2(Z)} = \\ &= \frac{-K_N(-\alpha K_P(m_P + Q_2) - (\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3)Z + \delta Z^2)}{(-\alpha K_P(m_P + Q_2) - (\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3)Z + \delta Z^2) + \alpha K_P \mu_P}. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя в первое уравнение системы (2), получаем уравнение для определения Z :

$$\begin{aligned} F_N(Z) &= Q_1 N_0 + \frac{Q_1 K_N (-\alpha K_P(m_P + Q_2) - (\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3)Z + \delta Z^2)}{(-\alpha K_P(m_P + Q_2) - (\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3)Z + \delta Z^2) + \alpha K_P \mu_P} + \\ &\quad \beta(m_Z Z + \delta Z^2) + \\ &\quad + \frac{(m_Z + Q_3 + \delta Z)(-\alpha K_P((1 - \beta)m_P + Q_2) - (\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3)Z + \delta Z^2)}{\alpha(\alpha\mu_Z - (m_Z + Q_3 + \delta Z))} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Положительное равновесие $E(N^*, P^*, Z^*)$ существует, если корень $Z^* > 0$ уравнения (6) таков, что $P(Z^*)$ и $N(Z^*)$, определяемые (4) и (5), также положительны.

Утверждение 1. Положительное равновесие системы (1) существует, если

параметры модели удовлетворяют условиям

$$\mu_P > \mu_P^1, \mu_Z > \mu_Z^1, \quad \mu_P^1 = \frac{(m_P + Q_2)(N_0 + K_N)}{N_0},$$

$$\mu_Z^1 = \frac{(m_Z + Q_3)}{\alpha} \left[1 + \frac{K_P((1-\beta)m_P + Q_2)(\mu_P - m_P - Q_2)}{Q_1 N_0 (\mu_P - \mu_P^1)} \right]. \quad (7)$$

Доказательство.

Значение $P^* > 0$, если

$$P_2(Z) = -(Q_3 - \alpha\mu_Z + m_Z) - \delta Z > 0.$$

В силу ограничения (3) это условие выполнится, когда

$$Z < Z_0 = \frac{1}{\delta}(\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3). \quad (8)$$

Равновесное значение $N^* > 0$, если выполняется условие

$$-\alpha K_P \mu_P < (-\alpha K_P(Q_2 + m_P) - (\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3)Z + \delta Z^2) < 0.$$

Правая часть неравенства справедлива при $Z < Z_0$. Левая часть

$$(-\alpha K_P(Q_2 + m_P - \mu_P) - (\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3)Z + \delta Z^2) > 0, \quad Z < Z_0 \text{ при } 0 < \mu_Z < \mu_Z^0,$$

$$\mu_Z^0 = \frac{1}{\alpha} \left(2\sqrt{\delta\alpha K_P(\mu_P - Q_2 - m_P)} + Q_3 + m_Z \right) \quad (9)$$

выполняется для всех $0 < Z < Z_0$.

Если

$$\mu_Z > \mu_Z^0, \quad (10)$$

то неравенство выполняется для $Z \in (0, Z_1) \cup (Z_2, \infty)$,

$$Z_1 = \frac{(\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3) - \sqrt{(\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3)^2 - 4\delta\alpha K_P(\mu_P - m_P - Q_2)}}{2\delta},$$

$$Z_2 = \frac{(\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3) + \sqrt{(\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3)^2 - 4\delta\alpha K_P(\mu_P - m_P - Q_2)}}{2\delta}. \quad (11)$$

Выясним вопрос существования корней уравнения (6) в указанных диапазонах. Заметим, что

$$F_N(Z=0) = Q_1 N_0 - \frac{Q_1 K_N (m_P + Q_2)}{(\mu_P - m_P - Q_2)} - \frac{K_P (m_Z + Q_3)((1-\beta)m_P + Q_2)}{(\alpha\mu_Z - m_Z - Q_3)} > 0, \quad (12)$$

при ограничениях на параметры (7).

Если, кроме (7), для μ_Z выполняется (10), то на интервале $(0, Z_1)$ $N(Z)$ принимает положительные значения, а при приближении к Z_1 слева неограниченно возрастает. Значение $F_N(Z) < 0$ в точке $Z = Z_1 - \varepsilon$ при достаточно малом ε , так как второе слагаемое в (6) $-N(Z)$ неограниченно убывает при приближении к Z_1 слева, а остальные слагаемые ограничены. Следовательно, при выполнении (7) и (10) $F_N(Z)$ на интервале $(0, Z_1)$ меняет знак. Значит, существует точка $0 < \check{Z} < Z_1$, в которой $F_N(\check{Z}) = 0$, причем $P(\check{Z}) > 0$, $N(\check{Z}) > 0$. Эта точка и определяет положительное равновесное состояние $E(N(\check{Z}), P(\check{Z}), \check{Z})$.

Если $\mu_Z < \mu_Z^0$, то $N(Z) > 0$ и $P(Z) > 0$ при $0 < Z < Z_0$, причем в точке Z_0 $N(Z)$

ограниченно, а при приближении к ней слева $P(Z)$ неограниченно возрастает. Тогда последнее слагаемое из (6) в точке $Z = Z_0 - \varepsilon$, при уменьшении ε неограниченно убывает (числитель отрицателен на интервале $(0, Z_0)$), а остальные члены – ограниченные функции. Следовательно, при достаточно малом ε , $F_N(Z_0 - \varepsilon) < 0$. Это означает, что при выполнении условия (7) $F_N(Z)$ на интервале $(0, Z_0)$ меняет знак и существует $0 < \check{Z} < Z_0$: $F_N(\check{Z}) = 0$, $P(\check{Z}) > 0$, $N(\check{Z}) > 0$.

Таким образом, при ограничениях на параметры (7) система (1) имеет как минимум одно положительное равновесие.

Исследование устойчивости равновесных состояний

Так как положительное равновесие $E(N^*, P^*, Z^*)$ не имеет аналитического выражения, то устойчивость исследовалась численно, с использованием критерия Рауса-Гурвица.

В качестве лимитирующего биогенного элемента выбран азот [13, 14], все моделируемые компоненты также рассматриваются в единицах азота: $mmolNm^{-3}$. Значения основных параметров системы (1) определим, исходя из литературных данных [15, 16]:

$$\begin{aligned} \beta &= 0.1, \alpha = 0.75 \text{сутки}^{-1}, \\ m_P &= 0.08 \text{сутки}^{-1}, m_Z = 0.05 \text{сутки}^{-1}, \\ K_N &= 1.5 \text{mmol } N m^{-3}, K_P = 1 \text{mmol } N m^{-3}, \\ Q_1 &= Q_2 = Q_3 = 0.01 \text{сутки}^{-1}, N_0 = 20 \text{mmol } N m^{-3}. \end{aligned} \quad (13)$$

Неопределенными остаются скорость выедания зоопланктона μ_Z , максимальная скорость роста фитопланктона μ_P и интенсивность внутривидовых взаимодействий зоопланктона δ . Условия существования положительного равновесия системы (7) для выбранных значений параметров (13) определяются как:

$$\mu_P > 0.1, \mu_Z > 0.08 \left(1 + 0.004 \frac{\mu_P - 0.09}{\mu_P - 0.097} \right). \quad (14)$$

Таким образом, практически при всех биологически обоснованных значениях этих коэффициентов существует положительное равновесие системы. Исходя из литературных данных, обычно используется следующий диапазон скорости роста фитопланктона: $0.7 < \mu_P < 3$. Исследования показали, что увеличение биомассы фитопланктона может осуществляться лишь в том случае, если скорость его роста превышает скорость его потребления зоопланктоном [17 – 19]: $0 < \mu_Z < \mu_P$. В численной реализации модели мы расширили этот диапазон: $0.5 < \mu_P < 3$, $0 < \mu_Z < 5$. Для интенсивности внутривидовых взаимодействий верхняя граница также установлена выше встречающейся в природе: $0 < \delta < 1$.

Численный анализ существования положительных равновесий системы (1) и их устойчивости показал, что при выполнении условия (14) существует единственное положительное состояние равновесия. На рис. 1 для значений скорости роста фитопланктона $\mu_P = 0.5, 1, 2, 3$ представлены области устойчивости (3), не-

устойчивости (2) положительного равновесия и зоны (1), определяющей значения параметров, при которых не существует положительного равновесия.

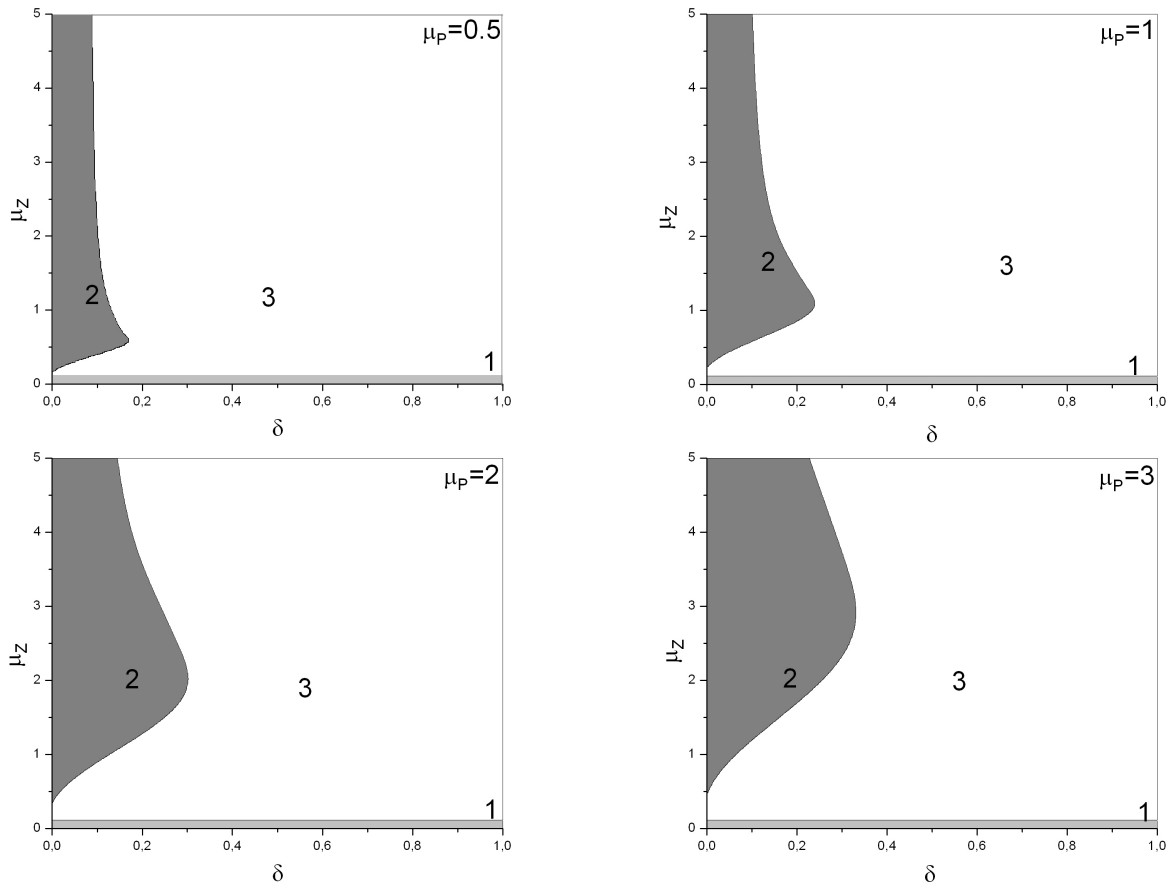


Рис. 1. Области устойчивости положительного равновесия системы (1): 1 – положительные равновесия не существуют; 2 – равновесие неустойчиво; 3 – равновесие устойчиво.

С возрастанием скорости роста фитопланктона увеличивается и область неустойчивости, причем при больших значениях μ_p равновесия устойчивы и при невысокой активности зоопланктона. Параметрические портреты демонстрируют при всех значениях μ_p схожую картину. При малых значениях δ для всех $\mu_z > M_1$ равновесия становятся неустойчивыми (рис. 2а).

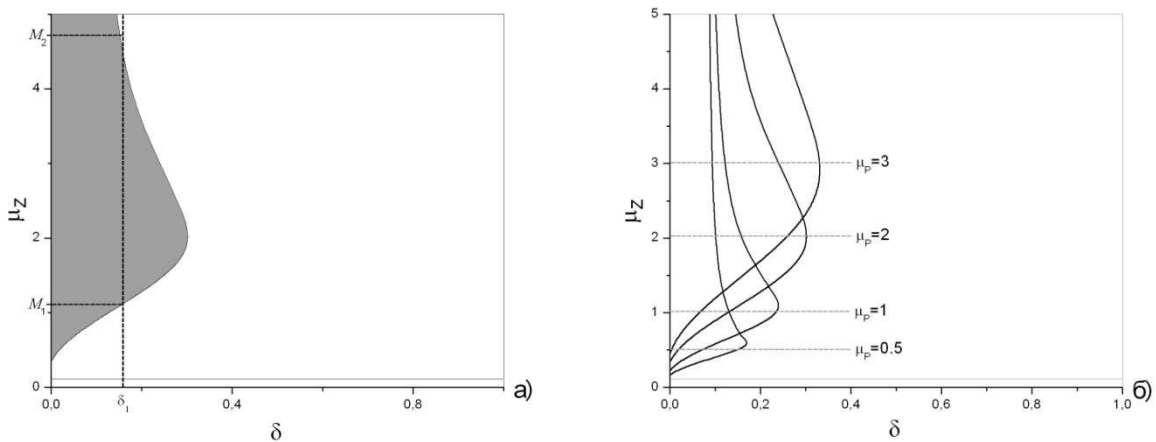


Рис. 2. Зависимость коэффициентов системы и границы области неустойчивости.

С ростом δ при определенном значении δ_1 включается механизм самоограничения и система с некоторого $\mu_z > M_2$ стабилизируется. При большой интен-

сивности внутривидовых взаимодействий равновесия устойчивы при любых значениях скорости выедания μ_Z . Заметим, что значения δ_1, M_1, M_2 зависят от μ_P . Пик области неустойчивости – точка (μ_Z, δ) с наибольшим значением интенсивности внутривидовых взаимодействий, в ней совпадают скорости роста фитопланктона и его выедания зоопланктоном (см. рис. 2б).

На рис. 3 приведен пример, демонстрирующий этот процесс при $\mu_P = 1$ и трех вариантах интенсивности δ .

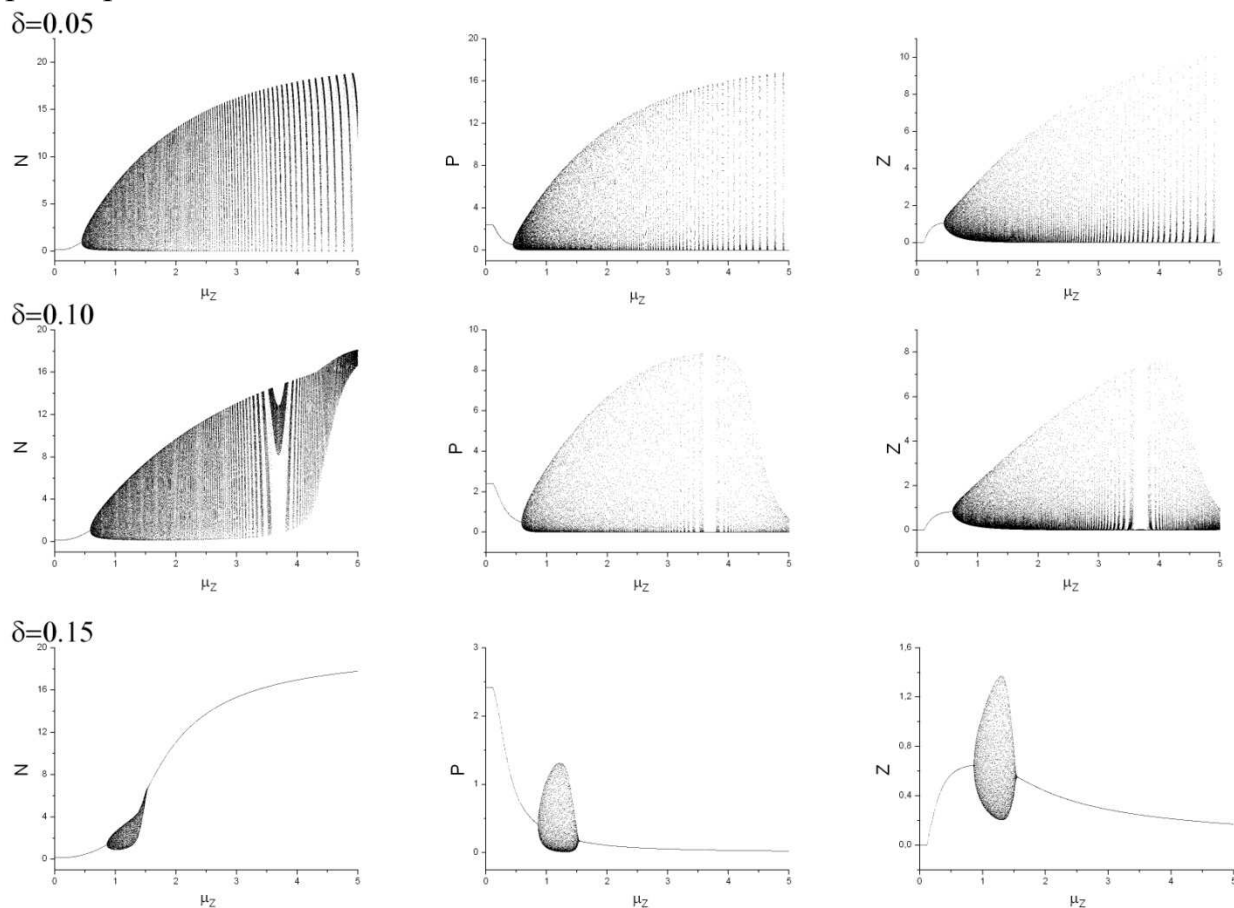


Рис. 3. Бифуркационные диаграммы системы при $\mu_P = 1$.

При малых значениях δ равновесия системы устойчивы при небольшой интенсивности хищничества зоопланктона. С ростом μ_Z монотонное стремление к равновесию сменяется сначала колебательным режимом, а потом и квазистохастическим поведением, причем при близких значениях μ_Z популяции планктона либо вымирают, либо совершают хаотические колебания. С увеличением интенсивности внутривидовых взаимодействий зоопланктона с некоторого значения скорости выедания μ_Z , когда биомасса хищника достаточно велика, включается механизм самоограничения популяции хищника.

В работах [2, 3, 10] по исследованию влияния внутритрофического хищничества построены бифуркационные диаграммы по параметру δ , они демонстрируют стабилизацию равновесий с увеличением этого параметра. Однако представляет интерес не только сам факт влияния самоограничения на состояние равновесий, но и его связь со скоростями роста хищника и жертвы. При малой интенсивности он не срабатывает, даже если скорость роста фитопланктона высока. В этом случае наблюдаются колебания биомассы жертв и хищника, причем био-

масса зоопланктона достигает высоких значений, и влияние квадратичного члена в функции смертности должно было бы проявляться. Колебания биомассы начинают затухать при определенных соотношениях внутритрофического и межпопуляционного хищничества. С ростом δ область, в которой равновесие неустойчиво, сжимается. Начиная с некоторого значения δ равновесия устойчивы, даже если скорость выедания зоопланктоном фитопланктона ниже интенсивности внутритрофических взаимодействий. При увеличении скорости роста фитопланктона наблюдается похожая картина. Разница лишь в увеличении значений параметров μ_Z и δ , при которых равновесия теряют устойчивость и вновь стабилизируются, т.е. δ_1, M_1, M_2 .

Сравним динамику биомассы зоопланктона при различных значениях интенсивности выедания фитопланктона. При $\mu_P = 1$ и $\delta = 0.15$ фазовые траектории в системе фитопланктон-зоопланктон представлены на рис. 4.

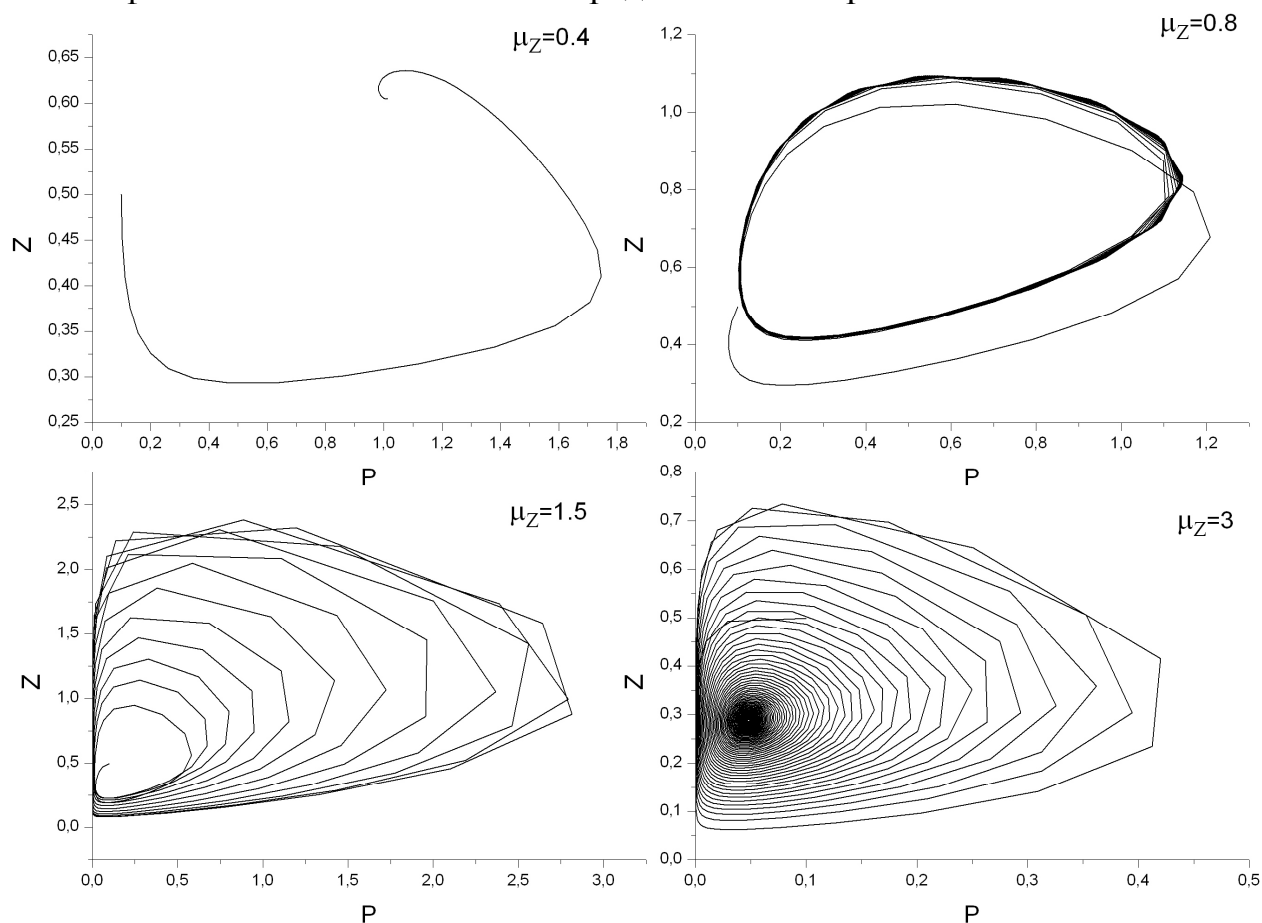


Рис.4. Фазовые траектории системы при $\mu_P = 1, \delta = 0.15$.

Варианты $\mu_Z = 0.4$ и $\mu_Z = 3$ соответствуют случаю существования устойчивого положительного равновесия. При высокой скорости выедания наблюдаются затухающие колебания, однако процесс стабилизации биомассы составляет более 1000 суток. Значения $\mu_Z = 0.8$ и $\mu_Z = 1.5$ соответствуют неустойчивым равновесиям.

Заключение

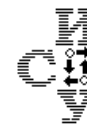
В работе представлена модель взаимодействия планктонного сообщества с учетом питательных веществ. Рассмотрен вопрос существования положительных

равновесий. Показано, что внутренние равновесия существуют при ограничениях на коэффициенты роста фитопланктона и скорости выедания зоопланктоном фитопланктона. Причем условия существования (7) не зависят от интенсивности внутривидовых взаимодействий. Возрастание биомассы жертвы порождает неустойчивость [5, 6]. Известно, что в этом случае возникают колебания, амплитуда которых увеличивается с ростом скорости выедания хищником жертв. При высоких значениях биомассы хищника должен срабатывать фактор самоограничения популяции. Наши примеры показывают, что этот механизм включается, если интенсивность внутривидовых взаимодействий достигает некоторого значения, зависящего от скорости роста фитопланктона. В рассмотренных примерах это значение находится в диапазоне $0.9 < \delta < 0.22$ при $0.5 < \mu_p < 3$. При значении δ выше некоторой величины равновесия устойчивы при любых значениях скорости выедания μ_z . Устойчивость равновесий определяется не только интенсивностью внутривидовых взаимодействий, но и скоростью выедания хищником жертв.

При небольших значениях μ_z фактор самоограничения популяции зоопланктона не срабатывает, даже если биомассы хищника и жертвы достигают высоких значений. В этом случае квадратичный член в функции смертности должен уменьшить биомассу зоопланктона и стабилизировать систему. Однако лишь при определенных соотношениях внутритрофического и межвидового хищничества колебания биомассы начинают затухать. Показано, если скорости роста фитопланктона и его выедания совпадают, равновесие становится устойчивым при максимальной интенсивности внутривидовых взаимодействий в сравнении с другими вариантами хищничества.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Skalski G.T., Gilliam J.F.* Functional responses with predator interference: viable alternatives to the Holling type II model // *Ecology*. – 2001. – Vol. 82(11). – P.3083-3092.
2. *Ruan Sh., Ardito A., Ricciardi P., Don L. DeAngelis* Coexistence in competition models with density-dependent mortality // *C. R. Biologies*. – 2007. – Vol. 330. – P.845-854.
3. *Caswell H., Neubert M.G.* Chaos and closure terms in plankton food chain models // *J. Plankton Res.* – 1998. – Vol. 20. – P.1837-1845.
4. *Pitchford J, Brindley J.* Intratrophic predation in simple predator-prey models // *Bull. Math. Biol.* – 1998. – Vol. 60. – P.937-953.
5. Базыкин А. Д. Биофизика взаимодействующих популяций. – М. 1985.
6. *Свирижев Ю.М. Логофет Д.О.* Устойчивость биологических сообществ. – М.: Наука, 1978.
7. *Polis, G.A.* The evolution and dynamics of intratrophic predation // *Ann. Rev. Ecol. Syst.* – 1981. – Vol. 12. – P.225-251.
8. *Kohlmeier C., Ebenhoh W.* The stabilizing role of cannibalism in a predator-prey system. *Bull. Math. Biol.* – 1995. – Vol. 57. – P.401-411.
9. *Jang S., Baglama J.* A nutrient-predator-prey model with intratrophic predation // *Appl. Math. Comput.* – 2002. – Vol. 129. – P.517-536.
10. *Jang S., Baglama J., Seshaiyer P.* Intratrophic predation in a simple food chain with fluctuating nutrient // *Discr. Cont. Dyn. Sys., Ser. B.* – 2005. – Vol. 5, Num. 2. – P.335352.
11. *Jang S., Baglama J., Seshaiyer P.* Droop models of nutrient-plankton interaction with intratrophic predation // *Appl. Math. Comput.* – 2005. – Vol. 169, Issue 2. – P.1106-1128.



12. Edward A.M., Martin A., Bees M.A. Generic dynamics of a simple plankton population model with a non-integer exponent of closure // Chaos, Solitons and Fractals. – 2001. – Vol. 12. – P. 289-300.
13. Gin K.Y.H., Guo J., Cheong H.F. A size-based ecosystem model for pelagic waters // Ecological Modelling. – 1998. – Vol. 112. – P.53-72.
14. Fennel, K. Interannual and regional variability of chemical-biological variables in a coupled 3-D model of the western Baltic // Hydrobiologia. – 1999. – Vol. 393. – P.25-33.
15. Roy S. et al. Sequential variations of phytoplankton growth and mortality in an NPZ model: A remote-sensing-based assessment // Journal of Marine Systems. – 2012. – Vol. 92. – P. 16-29.
16. Charria G. et al. Importance of Dissolved Organic Nitrogen in the North Atlantic Ocean in sustaining primary production: a 3D modeling approach // Biogeosciences. – 2008. – Vol.5. – P. 1437-1455.
17. Calbet A. Phytoplankton growth, microzooplankton grazing and carbon cycling in marine systems / Calbet A., Landry M.R. // Limnol. Oceanogr. – 2004. – Vol. 49. – P. 51-57.
18. Odate T. Seasonal variation in chlorophyll-specific growth and microzooplankton grazing of phytoplankton in Japanese coastal water / Odate T., Imai K. // J. Plankton Res. – 2003. – Vol. 25. – P. 1497-1505.
19. Palomares-Garcia R. Pigment-specific rates of phytoplankton growth and microzooplankton grazing in a subtropical lagoon / R. Palomares-Garcia, J.J. Bustillos-Guzman, D. Lopez-Cortes // J. Plankton Res. – 2006. – Vol. 28. – P. 1217-1232.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.И. Абакумовым.

E-mail:

Гиричева Евгения Евгеньевна – evg.giricheva@yandex.ru.

УДК 004.942

© 2014 г. В.М. Дмитриев, д-р техн. наук,

О.С. Затик, канд. техн. наук,

Т.В. Ганджа, канд. техн. наук

(Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники)

МЕТОДИКА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ В КОНТЕКСТЕ СИНТЕЗА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОГРАММ*

Рассматриваются методика и пример имитационного моделирования деятельности предприятия с учетом экологического аспекта в среде MAPS. Методика основана на формализме метода компонентных цепей для анализа эколого-экономических систем и синтеза производственных экологических программ нефтегазовых предприятий.

Ключевые слова: моделирование, программное планирование.

* Исследование проведено при поддержке гранта РФФИ, проект № 13-07-00378а.