



УДК 51-76:[57.03,574.5]

© 2013 г. **Е.Е. Гиричева**, канд. физ.-мат. наук  
(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

## **ВЛИЯНИЕ СУТОЧНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ МИГРАЦИЙ ЗООПЛАНКТОНА НА СОСТОЯНИЕ ПЛАНКТОННОГО СООБЩЕСТВА \***

Рассматривается взаимодействие популяций планктона в вертикальном столбе воды. В работе исследуется динамика сообщества под влиянием направленных перемещений популяции зоопланктона, обусловленных суточной миграцией и поисковой активностью.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, вертикальное распределение планктона, суточные вертикальные миграции.

### **Введение**

Состояние экосистемы, в частности планктонного сообщества, подвержено влиянию множества факторов различной природы. Концентрация фитопланктона зависит не только от обеспеченности питательными веществами, температуры, ФАР (фотосинтетически активной радиации), но и от хищничества зоопланктона [1]. В свою очередь сообщество зоопланктона зависит не только от доступности фитопланктона, но и от способности хищничества, а также освещенности и температуры.

При моделировании вертикального распределения зоопланктона необходимо учитывать не только пассивное перемещение, связанное с диффузией, но и такой важный фактор как активные перемещения организмов. Они могут вызываться различными причинами, среди которых сезонные, возрастные, суточные, связанные с потребностью размножения, питания, защиты от врагов, обусловленные гидрологическими условиями.

Основная идея суточных перемещений состоит в том, что особи зоопланктона днем находятся на глубине, а за несколько часов до захода солнца поднимаются к поверхности. С началом проникновения света в воду наблюдается быстрый уход на глубину.

Несмотря на длительный период исследования, механизм суточных вертикальных миграций (DVM – diel vertical migration) и их экологический смысл все

---

\* Работа поддержана грантом ДВО РАН по программе «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы» фундаментальных исследований Президиума РАН, проект № 12-I-П15-02, и грантом ДВО РАН конкурса интеграционных проектов с СО РАН, проект № 12-II-СО-01М-010 ДВО РАН.

еще далеко не ясны. Существует несколько теорий опускания зоопланктона на глубину. Низкая температура снижает обмен веществ, энергетические траты на поддержание жизнедеятельности [2 – 4]. Уход с поверхности в дневные часы может быть вызван ингибированием особой светом [5].

Рядом исследователей [5 – 9] предложено следующее обоснование. В темное время суток планктонные животные питаются в верхних слоях воды, где наблюдается высокая концентрация водорослей, а на светлое время суток уходят вглубь, уменьшая свою доступность для рыб-зоопланктофагов, прежде всего «зрительных». Этот фактор указывается как основная причина суточных вертикальных миграций, классифицируя DVM как механизм адаптации зоопланктона [10 – 12].

Каждая из теорий находит своих сторонников и противников. Возможно, в действительности природа вертикальных суточных миграций может быть разной для различных видов, стадий развития, половой принадлежности особей зоопланктона.

По сравнению с исследованиями, посвященными причинам суточных вертикальных миграций, сравнительно небольшое количество работ в последнее время связано с влиянием вертикальных перемещений зоопланктона на популяцию фитопланктона, его структуру [13]. Вследствие суточных миграций питание становится импульсным. Рядом исследователей [14 – 16] было показано, что такой режим питания вызывает изменения продуктивности и перестройку сообщества фитопланктона.

В работе рассматривается взаимодействие популяций планктона под влиянием активных вертикальных перемещений зоопланктона. Исследуется влияние суточных миграций и таксиса на распределение популяций в вертикальном столбе воды и динамику их биомассы.

### Описание модели

Рассматривается трехкомпонентная модель взаимодействия планктонного сообщества с учетом биогенов в верхнем перемешанном слое воды. Перемещения питательных веществ ( $N$ ), фитопланктона ( $P$ ) и зоопланктона ( $Z$ )  $x$  описываются турбулентной диффузией

$$D_1 \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}, D_2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, D_3 \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2}.$$

Направленные перемещения зоопланктона описываются адвективными членами:  $v(t, x) \frac{\partial Z}{\partial x}$  – суточные миграции,  $\frac{\partial}{\partial x} \left( w(t, x) Z \frac{\partial P}{\partial x} \right)$  – таксис. Поиск поведение моделируется в соответствии с предположением о пропорциональности скорости перемещения хищника градиенту плотности популяции жертв. Локальное взаимодействие компонент описывают функции:

$$F_N(N, P, Z), F_P(N, P, Z), F_Z(N, P, Z).$$

Изменение плотности биомассы компонент опишем системой дифференциальных уравнений типа «реакция-адвекция-диффузия»:

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + F_N(N, P, Z), \\ \frac{\partial P}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + F_P(N, P, Z), \\ \frac{\partial Z}{\partial t} = D_3 \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} - v(t, x) \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( w(t, x) Z \frac{\partial P}{\partial x} \right) + F_Z(N, P, Z). \end{cases} \quad (1)$$

Система рассматривается в столбе воды, границы которого представляют поверхностный слой  $x = 0$  и границу перемешанного слоя  $x = \bar{x}$ . Граничные условия зададим в виде:

$$\frac{\partial N}{\partial x}(t, 0) = \frac{\partial N}{\partial x}(t, \bar{x}) = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial x}(t, 0) = \frac{\partial P}{\partial x}(t, \bar{x}) = 0, \quad \frac{\partial Z}{\partial x}(t, 0) = \frac{\partial Z}{\partial x}(t, \bar{x}) = 0.$$

Такого типа уравнения использованы в работах [17 – 19] и других. Биологический смысл граничных условий – изолированность рассматриваемого трофического сообщества.

В каждой точке рассматриваемой области динамика взаимодействий компонент описывается системой

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

Все параметры системы положительны и имеют следующий экологический смысл:  $\mu_P$  – максимальная скорость роста фитопланктона;  $K_N$  – константа полунасыщения фитопланктона по биогенам;  $\beta$  – коэффициент реминерализации мертвой органики;  $m_P$  – удельная смертность фитопланктона;  $\mu_Z$  – максимальная скорость выедания зоопланктоном фитопланктона;  $K_P$  – константа полунасыщения зоопланктона по фитопланктону;  $\alpha$  – эффективность питания зоопланктона;  $m_Z$  – удельная смертность зоопланктона;  $\gamma$  – внутривидовая конкуренция зоопланктона;  $Q_1, Q_2, Q_3$  – скорости вымывания;  $N_0$  – концентрация биогенов вне рассматриваемой области.

Первое уравнение системы (2) описывает локальную динамику питательных веществ в перемешанном слое. Изменение концентрации происходит за счет потока биогенов в рассматриваемую область и их оттока со скоростью  $Q_1$ , 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 из рассматриваемой области. Биомасса зоопланктона растет за счет трофических взаимодействий с фитопланктоном и убывает из-за естественной смертности, выедания рыбами и другими организмами, не учтенными в модели, а также внутри-

видовой конкуренции и вымывания.

Поглощение биогенов в процессе фотосинтеза описывается функцией Михаэлиса-Ментен, с константой полунасыщения  $K_N$ . При описании взаимодействия хищника-жертвы предполагается, что имеет место насыщение по концентрации жертв. В качестве трофической функции, описывающей выедание зоопланктоном фитопланктона, выбрана функция Холлинга II типа.

### Свойства решений

В качестве лимитирующего биогенного элемента выбран азот [20, 21], все моделируемые компоненты также рассматриваются в единицах азота:  $\text{mmol N m}^{-3}$ . Значения основных параметров системы (2) определим, исходя из литературных данных [22, 23]:

$$\begin{aligned} \beta &= 0.2, \alpha = 0.75 \text{сутки}^{-1}, \gamma = 0.3(\text{mmol N m}^{-3})^{-1} \text{сутки}^{-1}, \\ m_P &= 0.08 \text{сутки}^{-1}, m_Z = 0.02 \text{сутки}^{-1}, \\ K_N &= 0.5 \text{mmol N m}^{-3}, K_P = 1 \text{mmol N m}^{-3}, \\ Q_1 &= Q_2 = Q_3 = 0.01 \text{сутки}^{-1}, \\ N_0 &= 10 \text{mmol N m}^{-3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Неопределенными остаются коэффициент роста фитопланктона и скорость выедания зоопланктона. Исследования показали, что увеличение биомассы фитопланктона может осуществляться лишь в том случае, если скорость роста фитопланктона превышает скорость его потребления зоопланктоном [24 – 26]:

$$0 < \mu_Z < \mu_P \quad (4)$$

Численный анализ показал, что внутреннее равновесное состояние  $E(N^*, P^*, Z^*)$  системы (2) будет устойчивым в области параметров  $\mu_P, \mu_Z$ , указанной на рис. 1. Равновесия устойчивы практически при любых биологически обоснованных значениях коэффициентов ( $\mu_P < 3$ ), за исключением низких скоростей выедания зоопланктоном фитопланктона, при которых популяция существовать не сможет.

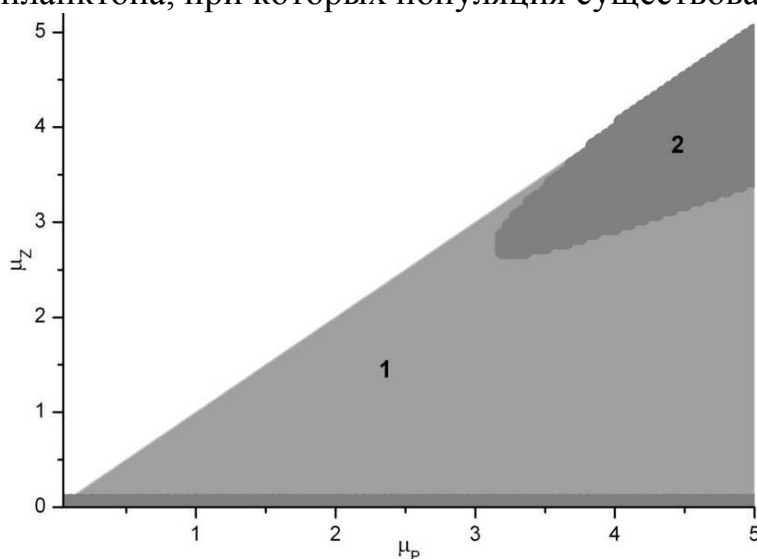


Рис. 1. Зоны устойчивости (1) и неустойчивости (2) положения равновесия системы (2).

## Варианты расчетов

Система рассматривается в перемешанном слое воды, глубину которого определим в 50 м. Именно в этом слое продуцируется основная масса органического вещества [27, 28].

Влияние освещенности как экологического фактора наглядно проявляется в вертикальном и сезонном распределении фитопланктона. В морях и озерах фитопланктон существует лишь в верхнем слое воды. Нижняя граница его в морских, более прозрачных водах, находится на глубине 40 – 70 м.

Прозрачность воды в данном случае влияет на водоросли не прямо, а косвенно, поскольку она определяет интенсивность проникновения в водную толщу солнечной радиации, без которой невозможен фотосинтез.

Принято, что плотность светового потока, падающего на поверхность моря, уменьшается с увеличением глубины по закону Бугера-Ламберта [29]:

$$I(x) = I_0 e^{-K_d x},$$

здесь  $I_0$ ,  $I(x)$  – интенсивность светового потока у поверхности и на глубине  $x$  соответственно;  $K_d$  – коэффициент затухания. Для Японского моря коэффициент затухания ФАР в зависимости от глубины и сезона находится в диапазоне от 0.06 до 0.29 [30].

В нашу модель не входит фактор света. Однако его влияние можно учесть косвенно, определив коэффициент роста фитопланктона как функцию глубины по аналогии с изменением светового потока:

$$\mu_p = \bar{\mu}_p e^{-\delta x}. \quad (5)$$

Параметр  $\delta$  положим равным 5. Нормируя пространственную координату, принимаем  $\bar{x} = 1$ . Тогда убывание коэффициента роста фитопланктона по глубине будет происходить с той же скоростью, что и интенсивность ФАР при  $K_d = 0.1$ .

В соответствии с литературными данными определяем коэффициенты роста фитопланктона  $\bar{\mu}_p = 1$  и скорость выедания зоопланктоном фитопланктона  $\mu_z = 0.5$ . Эти значения попадают в зону устойчивости положения равновесия системы (2).

Интерес представляет рассмотрение различных вариантов поведения зоопланктона: пассивное перемещение вследствие турбулентной диффузии, направленное движение (таксис), суточные миграции. С точки зрения изучения планктонных взаимодействий наибольший интерес представляет активная фаза вегетационного периода фитопланктона – весенне-летний период. В нашем рассмотрении это 150 суток – с апреля по сентябрь. Начальное распределение фитопланктона положим убывающим по глубине, а весь зоопланктон сконцентрирован у поверхности. Отсчет начинаем с начала суток – 00.00.

Для численного решения задачи (1) использована неявная конечно-разностная схема второго порядка точности по  $x$  и первого – по  $t$ .

Рассмотрим следующие варианты поведения зоопланктона без учета вертикальной суточной миграции ( $v(t,x) = 0$ ).

*Вариант 1.*  $w = 0.5$ ,  $\mu_z = \mu_z^0 = 0.5$ . И таксис, и хищничество продолжают

круглые сутки.

*Вариант 2.*  $w = \begin{cases} 0.5 & t \in (0, 1/6) \\ 0 & t \notin (0, 1/6) \end{cases}$ ,  $\mu_Z = \mu_Z^0$ . Таксис только ночью, хищничество – 24 часа.

*Вариант 3.*  $w = \begin{cases} 0.5 & t \in (0, 1/6) \\ 0 & t \notin (0, 1/6) \end{cases}$ ,  $\mu_Z = \begin{cases} 6\mu_Z^0 & t \in (0, 1/6) \\ 0 & t \notin (0, 1/6) \end{cases}$ . И таксис, и хищничество – только ночью. Питание происходит лишь 4 часа ночью, поэтому скорость выедания в данном варианте увеличена в 6 раз по сравнению с вариантом непрерывного питания.

В первом варианте через 10 суток зоопланктон смещается из верхнего слоя на глубину (рис. 2а). Наибольшая плотность – на глубине 20 м, а ниже его практически нет. К концу расчетного периода под действием диффузии распределение планктона становится более однородным (рис. 2 б).

Во втором варианте основная масса зоопланктона сосредоточена до глубины 20 м (рис. 2в). В первые 25 суток максимальная плотность планктона наблюдается сначала у поверхности, а затем постепенно смещается до глубины 20 м. После чего начинается хаотическое блуждание зоопланктона. Процесс стабилизируется к концу расчетного периода (рис. 2г). Планктон, насытившись в ночное время, достигает максимальной концентрации в утренние часы на глубине 5-15 м. До начала следующих суток пассивные перемещения зоопланктона приводят к более однородному его распределению в верхнем слое. С наступлением ночной активности процесс повторяется, это создает периодический режим.

В случае, когда зоопланктон питается только в ночные часы (вариант 3), картина схожа с вариантом 2 (рис. 2д). Однако в конце периода распределение более однородно.

Сравнивая динамику суммарной (по глубине) биомассы зоопланктона (рис. 4а), видим, что режим поисковой активности зоопланктона несущественно влияет на изменение его биомассы: варианты 1 и 2 демонстрируют схожую динамику. В случае дискретного питания первые 40 суток наблюдаются колебания биомассы зоопланктона. В конце периода динамика схожа с вариантами 1 и 2.

Добавим в рассмотрение вертикальную суточную миграцию зоопланктона – опускание на глубину в утренние часы и подъем к поверхности в вечерние. Функцию скорости зададим как кусочно-постоянную:

$$v(t, x) = \begin{cases} 0, & t \in (0, 1/6), \\ \bar{v}, & t \in (1/6, 1/2), \\ 0, & t \in (1/2, 2/3), \\ -\bar{v}, & t \in (2/3, 1). \end{cases}$$

Предполагая, что опускание зоопланктона происходит треть суток до глубины 30 м, считаем  $\bar{v} = 2$ .

Рассмотрим следующие варианты.

*Вариант 4.* Таксис только ночью, хищничество – весь день (как в варианте 2).

*Вариант 5.* И таксис, и хищничество – только ночью (как в варианте 3).

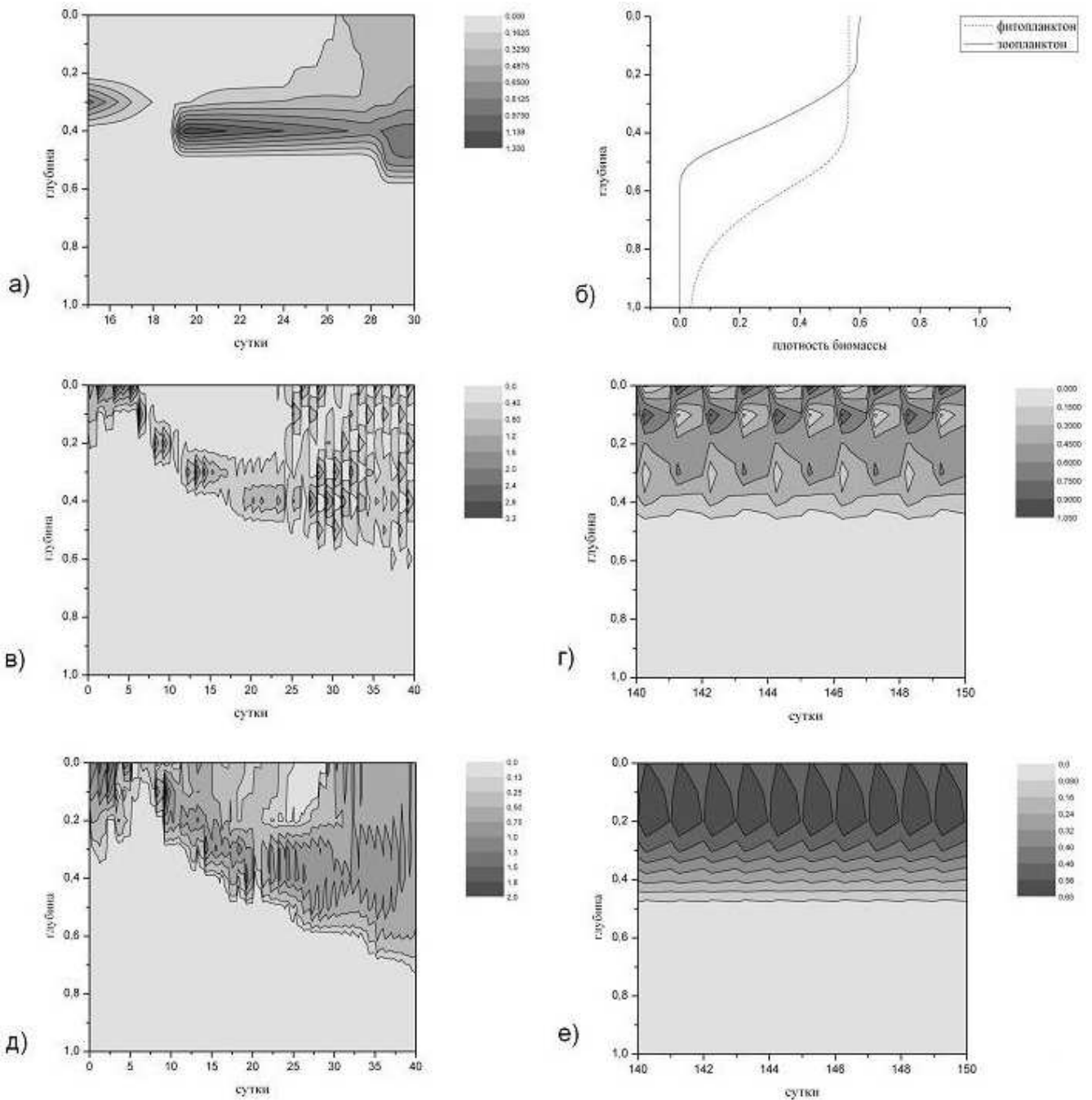


Рис. 2. Распределение зоопланктона: а, б – вариант 1; в, г – вариант 2; д, е – вариант 3.

$$\text{Вариант б. } w = 0, \mu_z = \begin{cases} 6\mu_z^0 & t \in (0,1/6) \\ 0 & t \notin (0,1/6) \end{cases}. \text{ Хищничество – только ночью, без}$$

таксиса.

Вариант 4 демонстрирует периодический режим (рис. 3а, 3б). Причем распределение зоопланктона по глубине практически идентично каждые сутки: максимальная плотность – до глубины 5 м в утренние часы, затем опускание на глубину «размазывает» планктон практически по всей глубине.

Включение режима питания лишь в ночные часы дестабилизирует систему (рис. 3в, 3г). Колебания биомассы зоопланктона неперiodичны. В периоды низкой биомассы его максимальная плотность наблюдается в утренние часы на глубине 10 м, в обеденное время – 35 м. Такой вариант питания вызывает колебания и

биомассы фитопланктона. Время между всплесками продуктивности составляет около 50 суток.

В случае, когда направленные движения определяют лишь суточные миграции и не учитывается таксис, распределение по глубине практически равномерно, даже в часы активного подъема и опускания особей на глубину (рис. 3д, 3е).

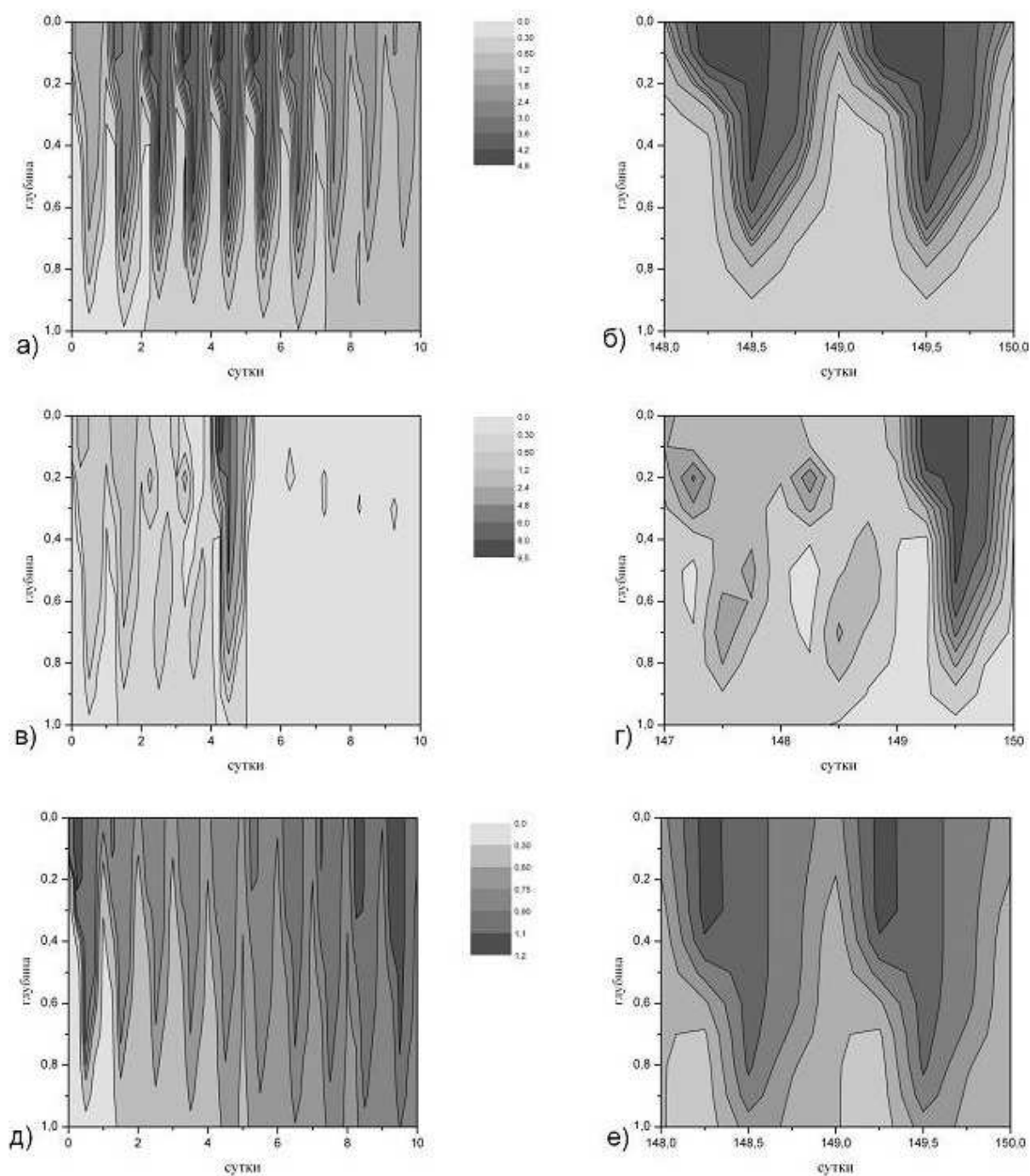


Рис. 3. Распределение зоопланктона: а, б – вариант 4; в, г – вариант 5; д, е – вариант 6.

Динамика общей биомассы зоопланктона в этих трех вариантах представлена на рис. 4. В вариантах 4 и 6 получаем, что суточные миграции стабилизировали систему, биомасса зоопланктона достигает устойчивого равновесия раньше, чем в предыдущих вариантах (рис. 4б). И только учет таксиса и импульсного питания приводит к колебательному режиму планктона, а непостоянное питание благоприятно сказывается на состоянии фитопланктона, увеличивая его биомассу (рис. 4г).



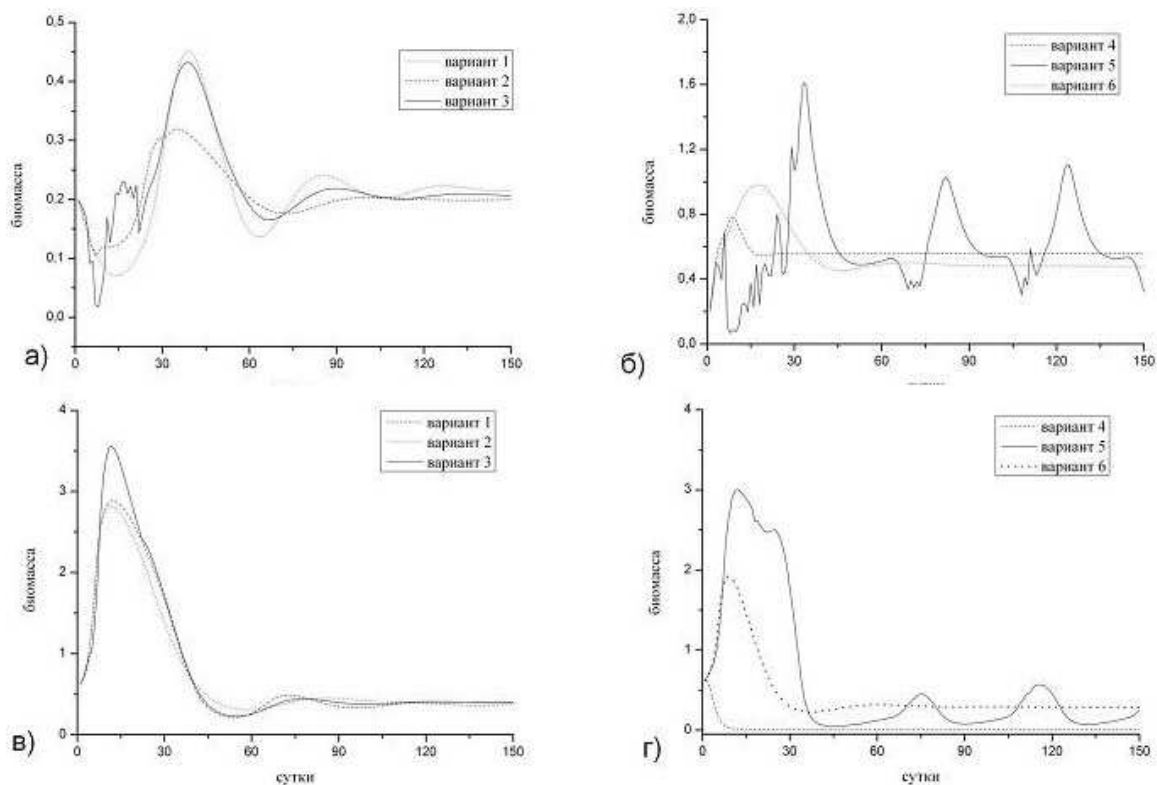


Рис. 4. Динамика биомассы: а, б – зоопланктона; в, г – фитопланктона.

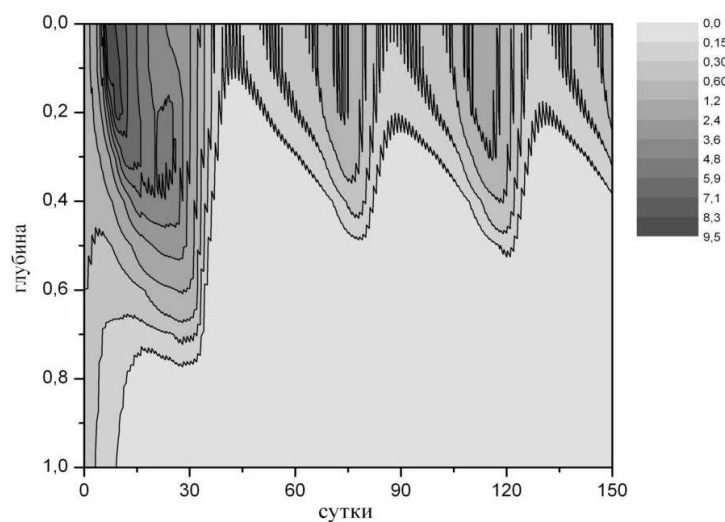


Рис. 5. Распределение фитопланктона.

## Заключение

Суточные миграции зоопланктона могут оказывать влияние как на саму популяцию, так и на сообщество фитопланктона. Как показали модельные расчеты, этот вид активности вносит существенные изменения в поведение планктона только в соединении с другими факторами: поисковой активностью (таксисом) и режимом питания. В целом суммарная биомасса зоопланктона выше, когда присутствуют и суточные миграции, и таксис. Пространственные перемещения увеличивают популяцию зоопланктона, но уменьшают популяцию фитопланктона. Учет этих двух вариантов активности не приводит к переэксплуатации фитопланктона лишь в том случае, когда питание зоопланктона становится ночным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Banase K.* Zooplankton: pivotal roles in the control of ocean production // *ICES Journal of Marine Science.* – 1995. – Vol. 52. – P.265-277.
2. *McLaren I.A.* Demographic strategy of vertical migration by a marine copepod // *American Naturalist.* – 1974. – Vol.108. – P.91-102.
3. *Enright J.T.* 1977. Diurnal vertical migration: adaptive significance and timing. Part 1. Selective advantage: a metabolic model // *Limnology and Oceanography* – 1977. – Vol. 22. – P. 856-872.
4. *Geller W.* Diurnal vertical migration of zooplankton in a temperate great lake (L. Constance): a starvation avoidance mechanism? // *Archiv fur Hydrobiologie.* – 1986. – Vol. 74 (Suppl.) – P.1-60.
5. *Ringelberg J.* The photobehaviour of *Daphnia* spp. as a model to explain diel vertical migration in zooplankton // *Biological Reviews.* – 1999. – Vol. 74. – P.397-423.
6. *Haney J.F.* Environmental control of diel vertical migration behavior // *Archiv f'ur Hydrobiologie.* – 1993. – Vol. 39. – P.1-17.
7. *Dagg M.J. et al.* Vertical migration and feeding behavior of *Calanus pacificus* females during a phytoplankton bloom in Dabob Bay, U.S. // *Limnol. Oceanogr.* – 1997. – Vol. 42. – P.974-980.
8. *Dini M.L., Carpenter S.R.* Fish predators, food availability and diel vertical migration in *Daphnia* // *J. Plankton Res.* – 1992. – Vol. 14. – P.359-377.
9. *Nesbitt L.M et al.* Opposing predation pressures and induced migration responses in *Daphnia* // *Limnol. Oceanogr.* – 1996. – Vol.41. – P.1306-1311.
10. *Zaret T.M., Suffern J.S.* Vertical migration in zooplankton as a predator avoidance mechanism // *Limnology and Oceanography.* – 1976. – Vol. 21 – P.804-813.
11. *Stich H.B., Lampert W.* Predator evasion as an explanation of diurnal vertical migration by zooplankton // *Nature.* – 1981. – Vol. 293. – P.396-398.
12. *Lampert W.* Ultimate causes of diel vertical migration of zooplankton: new evidence for the predator-avoidance hypothesis // *Archiv f'ur Hydrobiologie.* – 1993. – Vol. 39 – P.79-88.
13. *Petzold T. et al.* Effects of zooplankton diel vertical migration on a phytoplankton community: a scenario analysis of the underlying mechanisms // *Ecological Modelling.* – 2009. – Vol.220, I.9-10. – P.1358-1368.
14. *Petipa T.S., Makarova N.P.* Dependence of phytoplankton production on rhythm and rate of elimination // *Marine Biology.* – 1969. – Vol. 3 – P.191-195.
15. *McAllister C.D.* Aspects of estimating zooplankton production from phytoplankton production // *Journal of the Fisheries Research Board of Canada.* – 1969. – Vol. 26. – P.199-220.
16. *Lampert W.* Vertical migration of freshwater zooplankton: indirect effects of vertebrate predators on algal communities. In: Kerfoot, W.C., Sih, A., *Predation: direct and indirect impacts on aquatic communities.* University Press of New England, Hannover, N.H., USA. – 1987. – P.291-299.
17. *Kareiva P., and Odell G.* Swarms of predators exhibit "preytaxis" if individual predators use area-restricted search // *American Naturalist.* – 1987. – Vol. 130. – P.233-270.
18. *Turchin P.* Quantitative analysis of movement: measuring and modeling population redistribution in animals and plants. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts. – 1998.
19. *Березовская Ф.С., Карев Г.П.* Бифуркации бегущих волн в популяционных моделях с таксисом // *Успехи физических наук.* – 1999. – Т. 169, вып. 9. – С. 1011-1024.
20. *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.
21. *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.
22. *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.
23. *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.
24. *Calbe, A.* Phytoplankton growth, microzooplankton grazing, and carbon cycling in marine systems / Calbet A., Landry M.R. // *Limnol. Oceanogr.* – 2004. – Vol. 49. – P.51-57.



25. *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.
26. *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.
27. *Мантейфель Б.П.* Адаптивное значение периодических миграций водных организмов // *Вопросы ихтиологии.* – 1959. – Вып. 13. – С.3-15.
28. *Мантейфель Б.П.* Вертикальные миграции морских организмов // *Труды института морфологии животных.* – 1960. – Ч. 1. – Вып. 13.
29. *Монин А.С.* Оптика океана. – Т. 1. – М.: Наука, 1983.
30. *Kuwahara V.S. et al.* Variability in the Relative Penetration of Ultraviolet Radiation to Photosynthetically Available Radiation in Temperate Coastal Waters, Japan // *Journal of Oceanography.* – 2000. – Vol.56. – P.399-408.

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

*E-mail:*

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

УДК 681.51

© 2013 г. **Г.Б. Диго,**

**Н.Б. Диго,**

**А.Ю. Торгашов,** д-р техн. наук

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток),

**И.С. Можаровский**

(Владивостокский государственный университет экономики и сервиса)

## **МЕТОД РАЗРАБОТКИ ВИРТУАЛЬНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ\***

Обсуждается проблема выявления факторов, влияющих на точность показателя идентифицируемости модели нелинейного объекта управления. Излагается метод выбора его порогового значения, основанный на физико-химической сущности технологического объекта при формировании вида нелинейных функций по каждому входу виртуального анализатора. Приводится пример построения модели виртуального анализатора на основе предложенного метода применительно к технологическому объекту ответственного назначения.

**Ключевые слова:** идентифицируемость, структура модели, калибровка модели, виртуальный анализатор, массообменные процессы.

---

\* Работа выполнена при частичной поддержке гранта ДВО РАН № 12-I-П17-02 по программе фундаментальных исследований Президиума РАН №17 «Динамические системы и теория управления» и гранта ДВО РАН 12-III-A-03-221.