

для построения рекуррентных диаграмм с целью выявления режимов динамики, характерных для разностных моделей классического типа.

Количественный анализ рекуррентных диаграмм основан на подсчете элементов рекуррентных диаграмм в некоторых соотношениях. Численный анализ рекуррентных диаграмм позволяет вычислять меры сложности структур рекуррентных диаграмм, такие как мера рекуррентности, мера детерминизма, мера энтропии и др. [3]. Предполагается, что расчёт количественных мер рекуррентных диаграмм позволит убедиться в отсутствии хаотических и периодических режимов в численности моделируемых популяций и сделать вывод о границах применимости дискретных моделей в моделировании популяционной динамики.

В качестве инструмента для решения задачи была выбрана среда имитационного моделирования AnyLogic, позволяющая строить и анализировать модели разного типа, в том числе агентно-ориентированные модели. Построение рекуррентных диаграмм и расчёт количественных мер осуществлён в прикладном пакете Matlab.

Библиографический список

1. Топаж А. Г., Абрамова А. В., Толстопятов С. Е. Дискретные модели популяционной динамики: достоинства, проблемы и обоснование // Компьютерные исследования и моделирование – М., 2016. – Т. 8, №2. – С. 267–284.
2. Киселев В. Б. Рекуррентный анализ – теория и практика // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики – СПб., 2006. – №29. – С. 118–127.
3. Киселев В.Б., Крылов Б.А. Исследование динамики процессов методом вычисления мер количественного рекуррентного анализа в окне, смещаемом вдоль главной диагонали рекуррентной диагонали // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – СПб., 2008. – №11(56). – С. 62–72.

УДК 51-76

Моделирование вертикальной структуры фитопланктона с учетом активных перемещений зоопланктона

Е.Е. Гиричева

ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток

Пространственная структура планктонного сообщества определяется рядом биотических и абиотических факторов. На нее влияет как температура воды, освещенность, диффузионные процессы, так взаи-

модействия между видами. Вертикальная неоднородность также определяется и активными суточными перемещениями особей зоопланктона [1, 2]. Предлагается модель, описывающая пространственно-временную динамику фитопланктона (P), травоядного зоопланктона (Z_1) и хищного зоопланктона (Z_2) в вертикальном столбе воды с учетом суточных вертикальных миграций хищного зоопланктона. Изменение плотности популяций описывается системой «реакция-адвекция-диффузия»:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P}{\partial t} &= D_1 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + rP \left(1 + \frac{P}{K_p}\right) - \frac{\mu_1 P}{K_1 + P} Z_1 - \frac{\mu_2 \rho_1 P}{K_2 + \rho_1 P + \rho_2 Z_1} Z_2; \\ \frac{\partial Z_1}{\partial t} &= D_2 \frac{\partial^2 Z_1}{\partial x^2} + \frac{\alpha \mu_1 P}{K_1 + P} Z_1 - \frac{\mu_2 \rho_2 Z_1}{K_2 + \rho_1 P + \rho_2 Z_1} Z_2 - m_1 Z_1; \\ \frac{\partial Z_2}{\partial t} &= D_3 \frac{\partial^2 Z_2}{\partial x^2} - v(t, x) \frac{\partial Z_2}{\partial x} + \frac{\alpha \mu_2 (\rho_1 P + \rho_2 Z_1)}{K_2 + \rho_1 P + \rho_2 Z_1} Z_2 - \delta Z_2^2 - m_2 Z_2.\end{aligned}$$

Система рассматривается в одномерной области $x \in [0, X]$. Это может быть столб воды в поверхностном слое океана. Здесь D_1, D_2, D_3 – коэффициенты турбулентной диффузии, $v(t, x)$ – скорость суточных миграций хищного зоопланктона; r, K_p – скорость роста и емкость экологической ниши фитопланктона. Трофические функции Холлинга второго типа описывают потребление фитопланктона обоими видами зоопланктона с максимальными скоростями потребления μ_1, μ_2 и константами полунасыщения K_1, K_2 . При этом трофическая функция хищного зоопланктона учитывает избирательность питания, определяемую коэффициентами ρ_1 и ρ_2 . Эффективность питания зоопланктона – α , а убыль происходит по причине естественной смертности со скоростями m_1, m_2 и выедания хищного зоопланктона либо себе подобными, либо рыбами (δZ_2^2).

Численный анализ модели показал, что в системе возможно образование стационарных пространственных структур (Тьюрингова неустойчивость). На рисунке 1а представлена пространственно-временная динамика фитопланктона без учета вертикальных миграций зоопланктона и влияния света. Пространственная координата нормирована при $X=100$ м. Динамику вертикальных профилей фитопланктона с учетом затухания света демонстрирует рисунок 1б, на рис 1в – динамика с учетом влияния света и активных перемещений зоопланктона.

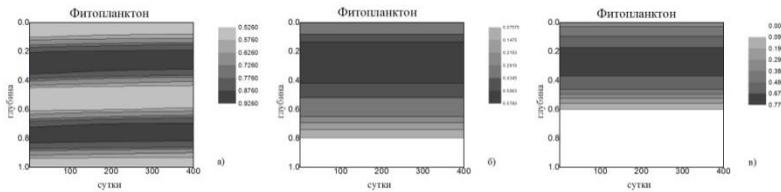


Рисунок 1 – Динамика плотности фитопланктона

В варианте без учета пространственной неоднородности среды и перемещений зоопланктона образуется стационарное пространственное распределение фитопланктона с пиками биомассы на глубинах 30 м и 80 м. При учете влияния света максимум биомассы на глубине 30 метров сохраняется, после чего наблюдается сокращение биомассы, и после 80 метров фитопланктона уже практически нет. Добавление суточных миграций зоопланктона концентрирует весь фитопланктон до глубины 60 метров, однако глубина максимальной плотности не меняется.

Библиографический список

1. 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.
2. Cheriton O.M., McManus M.A., Stacey M.T. and Steinbeck J.V. Physical and biological controls on the maintenance and dissipation of a thin phytoplankton layer // *Marine Ecology Progress Series*. – 2009. – Vol. 378. – P. 55–69.

УДК 662.997

Имитационное моделирование систем солнечного теплоснабжения в реальных климатических условиях

О.А. Ефремова
АлтГУ, г. Барнаул

Солнечная радиация – практически неисчерпаемый и экологически чистый источник энергии. На Землю поступает огромное количество солнечной энергии и до 1,5% всей этой энергии может быть использовано без ущерба для экологической среды. Статья посвящена одной из важнейших тем в области энергетики на нетрадиционных и возобновляемых источниках энергии – оценке основных параметров систем солнечного теплоснабжения с помощью математического и компьютерного моделирования.