



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации (МинобрНауки России)
Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований
Российской Академии Наук (ФИЦ ПНЦБИ РАН)

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения
Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ РАН
Институт математических проблем биологии РАН – филиал Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Материалы Восьмой Национальной научной конференции
с международным участием

Математическое моделирование в ЭКОЛОГИИ

9–11 ноября 2023 года
г. Пушкино, Московская область

$$\text{Leslie} = \begin{bmatrix} b_1 & \dots & 0 & b_n \\ s_1 & 0 & 0 & \\ 0 & \dots & s_{n-1} & 0 \end{bmatrix}$$

$$GPP = uAPAR \cdot \epsilon_{eff}$$

$$f(\varphi) = \left(\frac{\varphi - \varphi_{min}}{\varphi_{opt} - \varphi_{min}} \right)^{a(\varphi_{opt} - \varphi_{min})} * \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{\varphi_{max} - \varphi_{opt}} \right)^{a(\varphi_{max} - \varphi_{opt})}$$

<http://ecomodelling.ru/conferences/emm2023>

УДК 57+51-7
ББК 28в6
М34



Ответственные редакторы
доктор физико-математических наук П.Я. Грабарник
профессор, доктор физико-математических наук Д.О. Логофет

Математическое моделирование в экологии / Материалы Восьмой Национальной
научной конференции с международным участием, 9–11 ноября 2023 г. –
Пущино, ФИЦ ПНЦБИ РАН, 2023. 122 с.

Материалы Восьмой Национальной научной конференции с международным участием «Математическое моделирование в экологии» (ЭкоМатМод-2023) представляют современный уровень российских научных разработок в этой области знаний и содержат широкий спектр подходов к моделированию, применяемых для решения экологических задач. В сборнике представлены материалы докладов, посвященных различным проблемам математического моделирования экологических систем на организменном, популяционном, биогеоценотическом, региональном и глобальном уровнях организации живого покрова. Приведены подробные примеры применения математических моделей в экологических исследованиях. В ряде работ предложены новые математические методы, применяемые для решения задач в экологии. Сборник предназначен для математиков, экологов, биологов различных специальностей, почвоведов, географов, занимающихся анализом и прогнозированием развития биологических систем разных уровней организации, а также для студентов, магистрантов, аспирантов и широкого круга читателей, интересующихся современным состоянием моделирования в экологии.

© ФИЦ ПНЦБИ РАН, 2023

АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ: ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ

Фурсова П.В., Ризниченко Г.Ю., Конюхов И.В., Погосян С.И.

Биологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

fursova@biophys.msu.ru

Аннотация: Исследовано поведение агентной модели динамики численности популяции фитопланктона в зависимости от параметров среды. Среда состоит из двух слоёв, в каждом из которых организмам доступен только один из необходимых ресурсов: свет или минеральные вещества. Показано, что различные режимы поверхностной освещенности позволяют получить разнообразные распределения численностей клеток в верхнем и нижнем слое.

1. ВВЕДЕНИЕ

В специализированной интегрированной среде разработки NetLogo (NetLogo, 2023) разработана агентная модель динамики численности популяции диатомовых водорослей, обитающих в двуслойной среде. Компьютерная популяция состоит из совокупности клеток-агентов. Среда обитания представляет собой плоскость, состоящую из ячеек. Каждая ячейка характеризуется двумя величинами: интенсивностью света и содержанием питательных веществ. В верхнем слое содержание питательных веществ принимается равным нулю, интенсивность света падает с глубиной (по вертикали) в соответствии с экспоненциальным законом. В нижнем слое освещенность отсутствует, питательные вещества распределены равномерно, находятся в достатке, их содержание в ячейке не изменяется при потреблении клетками-агентами. Такие особенности среды характерны для краевых северных морей: наличие двух слоев воды с разной плотностью и соленостью обусловлено большим материковым стоком речных вод и таянием льдов. Поступление минеральных веществ из глубинных вод восполняет их содержание в горизонте, доступном для фитопланктона. Популяция клеток водоросли разбита на 2 группы – клетки, находящиеся в верхнем слое среды (ups) и нижнем (downs). Состояние агента описывается плотностью и внутриклеточным содержанием минеральных веществ. Для каждой клетки возможны следующие действия: увеличение или уменьшение плотности; запасание или расходование минеральных веществ; деление; смерть; переход из одной группы в другую; случайное перемещение на заданное расстояние. Функциональные зависимости и значения параметров, использованные в модели, описаны в работе (Фурсова и др., 2023). В основе правил поведения агентов лежит следующая гипотеза. В освещенном слое воды клетка накапливает биомассу за счет фотосинтеза. При этом она увеличивает свою плотность за счет сохранения объема, обусловленного наличием твердых кремниевых створок. С увеличением плотности клетка постепенно опускается до тех пор, пока ее плотность не сравняется с плотностью более соленой и плотной воды. В этом слое, богатом минеральными веществами, клетка восполняет свои внутриклеточные запасы. Оказавшись в условиях отсутствия света, клетка начинает тратить накопленные углеводы на различные метаболические процессы, в том числе дыхание. Выделяющийся углекислый газ удерживается вокруг клетки в образующемся слизевом мешке. При этом удельная масса этого «образования» (клетка + «мешок») постепенно падает. По достижении критического значения плотности клетка всплывает на поверхность, а пузырек газа схлопывается (Фурсова и др., 2023).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модельные эксперименты демонстрируют существенную зависимость характера поведения общей численности популяции, а также распределения агентов между группами, в зависимости от параметра поверхностной освещенности.

Как увеличение, так и снижение освещенности относительно условной максимально благоприятной может приводить к увеличению периода изменения общей численности. В условиях избыточного освещения происходит более частая гибель клеток. Кроме того, ускоренный расход внутриклеточных запасов минеральных веществ на солнце приводит к более длительному периоду их восполнения в нижнем слое. В результате количество клеток верхней группы варьируется сильнее, периодически снижаясь до 0. При снижении поверхностной освещенности можно наблюдать последовательную смену максимумов численностей агентов в верхнем и нижнем слое. Отметим, что данные экспедиционных исследований свидетельствуют о высокой пространственной и временной неоднородности содержания хлорофилла. Максимум содержания хлорофилла может находиться вблизи поверхности и на глубинах ниже скачка плотности воды или в верхнем и нижнем слоях одновременно. При повторных измерениях смещение судна за счет дрейфа сильно изменяет профиль распределения (Экосистемы..., 2021).

Один из параметров модели задает расстояние, на которое агент смещается в случайном направлении в каждый момент времени. Его можно сопоставить с условиями среды, вызывающими вынужденные перемещения клеток фитопланктона. Так, сильное увеличение этого параметра будет соответствовать повышению волнения на море. Кроме того, влияние на нахождение фитопланктона в той или иной точке среды может оказывать и фактор турбулентности разных видов. Проведенные численные эксперименты показали, что увеличение расстояния, на которое смещаются клетки, в условиях благоприятной поверхностной освещенности приводит к снижению общей численности клеток в сравнении с аналогичным экспериментом в отсутствии значительных перемещений. В условиях более высокой поверхностной освещенности общая численность клеток, перемещающихся на большие расстояния, становится выше, поскольку они оказываются в меньшей степени подверженными фотодеструкции. Динамика численностей каждой из групп также изменяется: при благоприятной поверхностной освещенности максимумы численностей верхних и нижних клеток сменяют друг друга так же, как при пониженной освещенности и несущественных перемещениях.

Исследование выполнено в рамках научного проекта государственного задания МГУ №121032500060-0 и Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова "Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды".

ЛИТЕРАТУРА

- Флинт М.В., Арашкевич Е.Г., Артемьев В.А. и др. Экосистемы морей Сибирской Арктики. Материалы экспедиционных исследований 2015 и 2017 гг. Москва: Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН, 2018. 232 с.
- Фурсова П.В., Ризниченко Г.Ю., Конюхов И.В., Погосян С.И. Агентная модель динамики численности популяций диатомовых водорослей краевых арктических морей в летний период (гипотеза) // Океанология. 2023. Т. 63, № 5. С. 1-11.
- Экосистемы Карского моря и моря Лаптевых. Экспедиционные исследования 2016 и 2018 гг. М.: Издатель Ерхова И.М., 2021. 368 с.
- NetLogo. URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (дата обращения: 14.08.2023)