

Муниципальное общеобразовательное учреждение  
Псковский Технический Лицей

Творческий проект по биологии

9 класс

**Изучение динамики популяции рыб в водоёме  
с помощью компьютерной модели**

Автор: Лутченко Евгения

Руководитель: Чугунова Н. А.

Псков

2023

# Содержание

1. Введение.
2. Создание компьютерной модели популяции рыб в водоёме.
  - 2.1. Математическое моделирование в биологии. Мультиагентное моделирование.
  - 2.2. Создание компьютерной модели жизни травоядных рыб в водоёме. Структура данных и алгоритм.
  - 2.3. Зависимость получаемых результатов от параметров модели.
  - 2.4. Усложнение модели через введение хищников.
  - 2.5. Результаты работы модели. Стабильность популяции. Зависимость численности рыб от времени.
  - 2.6. Оценка реалистичности полученных результатов.
  - 2.7. Перспективные направления дальнейшего исследования.
3. Выводы.
4. Использованная литература.

# 1. Введение

Снижение сырьевых ресурсов океана и увеличение затрат и потенциальных рисков для добычи рыбы в открытых водах ставит задачу использования внутренних водоемов – естественных прудов и озёр, а также водохранилищ и технических водоёмов для получения высококачественной рыбы. Для этого необходимо уметь рассчитывать динамику популяций различных видов рыб в замкнутых экосистемах.

Для Псковской области, в связи с необходимостью ежегодного распределения квот на вылов рыбы в Псковско-Чудском озере, задача о расчёте численности популяций различных пород промысловых рыб является также актуальной. Это дало бы возможность делать прогнозы уловов на ближайшие годы.

Изменение климата, а также нарастающие экологические проблемы оказывают сильное влияние на численность различных пород рыбы в Псковско-Чудском озере. Поэтому для оценки влияния различных природных и техногенных факторов на динамику популяций необходима достаточно гибкая компьютерная модель, учитывающая их влияние.

**Целью** нашей работы было создание компьютерной модели жизни рыб в замкнутом водоёме.

Мы решали следующие **задачи**:

- изучить построение математических моделей в биологии;
- создать математическую модель жизни травоядных рыб в замкнутом водоёме;
- написать компьютерную программу, реализующую эту модель;
- изучить поведение модели при разных параметрах;
- сделать модель более реалистичной, добавив в неё хищных рыб;

- определить параметры, при которых поведение экосистемы стабильно.

**Объект исследования** — популяции рыб в пресных водоёмах.

**Предмет исследования** — замкнутая экосистема пресного водоёма, включающая в себя травоядных и хищных рыб.

**Методы исследования:** математическое и компьютерное моделирование.

**Степень разработанности проблемы:** применение компьютерных моделей для расчёта популяционной динамики является перспективным и быстро развивающимся направлением в математической экологии.

**Новизна исследования:** В работе А. Е. Бобырева и коллектива авторов<sup>1</sup>, вышедшей в 2012 г., утверждается, что «нерегулярные колебания во времени биомассы популяций промысловых рыб в Псковско-Чудском озере носят детерминированный характер», а значит могут быть предсказаны. Однако, насколько нам известно, подобные расчёты для популяций промысловых рыб Псковско-Чудского озера не делались.

**Практическая значимость:** созданная нами компьютерная модель, несмотря на скромные объёмы данных и упрощённые правила, которыми мы описали жизненный цикл рыб, показывает применимость мультиагентного подхода к программному моделированию численности популяций в реальном водоёме. Продолжением исследования могло бы стать увеличение массивов данных, уточнение параметров модели, введение внешних условий (например, температура воды в водоёме, экологические факторы и т. п.).

---

<sup>1</sup> А.Е. Бобырев, В.А. Бурменский, Е.А. Криксунов, А.Б. Медвинский, М.М. Мельник, Н.И. Нуриева, А.В. Русаков. Анализ колебаний численности популяции промысловых рыб Псковско-Чудского озера // Биофизика, 2012, том 57, вып. 1, с. 140–145

## 2. Создание компьютерной модели популяции рыб в водоёме.

Модели динамики популяций были первыми математическими моделями в биологии. Самая первая модель была предложена ещё в XIII веке Леонардо Пизанским. Он описывал численность кроликов, которые неограниченно размножаются и не умирают, так что каждая пара кроликов порождает один раз в месяц новую пару. Результатом его исследования является знаменитый ряд чисел, названный по его имени «ряд Фибоначчи».

В XVIII веке Мальтус описал рост популяции, в которой нет конкуренции и скорость роста которой постоянна. Эта модель называется моделью экспоненциального роста. В ней количество особей увеличивается со скоростью, пропорциональной численности. Она относится к классу непрерывных моделей. В ней предполагается, что распределение особей по территории обитания всегда равномерно, всеми половыми и возрастными различиями между особями можно пренебречь, а численность популяции описывается детерминистическими уравнениями. Впоследствии непрерывные модели совершенствовались и усложнялись. Их несомненным достоинством была возможность получить численность и другие характеристики популяции как явную функцию времени. Однако, мы не могли увидеть процесс развития популяции в динамике.

Современные вычислительные мощности позволяют применить к изучению биологических систем методы прямого компьютерного моделирования. Такой подход называется **мультиагентным моделированием**. Реальная система представляется как множество однотипных единиц (*агентов*), между которыми действуют простые правила взаимодействия. Система развивается пошагово: на каждом шаге состояние агента изменяется. Просчитывая большое количество таких шагов, можно увидеть в динамике, как развивается система. Изменяя параметры модели, удаётся добиться поведения, схожего с реальным. Это даёт возможность изучать, как скажется на развитии системы то или иное воздействие

на неё, а также предсказывать различные события. В настоящее время мультиагентное моделирование применяется во многих сферах. С его помощью изучают развитие раковых опухолей и распространение эпидемий, управляют транспортными потоками и сетями связи, моделируют движение толпы и боевые действия, социально-экономические процессы и распространение информации в социальных сетях. А большинство школьников знакомо с мультиагентным моделированием на примере компьютерных игр жанра стратегий реального времени (RTS).

Мы будем использовать мультиагентный подход для построения модели жизни рыб в водоеме. Модель строится по принципу компьютерных игр-стратегий: основные ее элементы («юниты») – это отдельные рыбки. Они рождаются, растут и умирают, могут перемещаться по водоёму, питаются и размножаются. Сначала создадим модель популяции одного вида **нехищных** рыб. Условно назовем их «карасями». Сразу оговоримся — у нас нет цели описать именно карасёвую популяцию. Мы хотим создать некоторую универсальную базовую модель.

Как говорил один из создателей современной компьютерной науки Никлаус Вирт (автор языка программирования Pascal): «Программы = Алгоритмы + Структуры данных». К их описанию мы и переходим. Средой обитания наших агентов-рыбок является **озеро**. Поскольку мы используем для вычислений домашний компьютер, то будем представлять озеро одномерным массивом однотипных **участков**. Объект **участок\_озера** – место, где есть корм (трава), где рождаются, живут и умирают рыбы, в которое могут приплывать и откуда они могут уплывать. Каждый **участок** описывается следующими данными:

- **пища** — количество пищи (травы) на этом участке;
- **живность** — список всех рыб, которые сейчас на этом участке;

Наш главный объект — **Рыба**. Она описывается следующим набором параметров:

- **тип** рыбы (карась / щука / икринка, пол рыбы);
- **номер** участка\_озера, где рыба живет;
- «**здоровье**» рыбы (ХП, хитпойнты);
- **возраст** рыбы;

Помимо этого есть ещё **набор параметров**, которые задают свойства и поведение рыб, процессы в озере (прирост травы, сезонность и т. п.).

Создаём озеро интересующего нас размера и уровня корма. Заселяем его случайным образом стартовой популяцией рыб и запускаем пошаговую эволюцию. На каждом шаге мы перебираем по порядку все **участки\_озера**. В каждом участке мы перебираем всю **живность** в нём. Для каждой **рыбы** из списка живности мы выполняем **алгоритм действий** (жизненный цикл рыбы). У наших рыб есть возраст. На каждом шаге он увеличивается на единичку. Если рыба достигает **предельного возраста**, то она умирает. Проживание рыбой каждого дня требует затрат энергии (ХП). Если здоровье опустилось до нуля, рыба умирает. Свою энергию рыба пополняет через питание. У рыбы есть **предельное количество пищи**, которое она может съесть за шаг. Рыба пытается найти себе пищу только на том участке озера, на котором сейчас находится. Наши рыбы не умеют искать пищу, то есть целенаправленно плавать по озеру в поисках пищи. Эффективность питания ухудшается с возрастом (рыба стареет). Рыба может перемещаться по озеру – с вероятностью 1/3 она остается на старом месте, либо плывет в соседний справа или слева участок. Также наши рыбы могут размножаться. Для этого рыбе необходимо быть старше некоторого **возраста зрелости**. Размножение требует **затрат здоровья**. При этом самка рыбы мечет икру (**количество икринок** — параметр модели) на том участке, где находится. А самец оплодотворяет икринки, которые находятся на том же участке, где и он. Все оплодотворенные икринки

становятся рыбой с нулевым возрастом, а неоплодотворенные по достижении **предельного возраста икринок** умирают. Размножение возможно только в определенную часть года (**сезонность**).

Далее мы проводим серию запусков программы с разными параметрами, чтобы оценить правдоподобность нашей модели. Ресурсы нашего компьютера позволяют за разумное время (порядка 10 мин) обчислить примерно 10-20 лет (1 год равен условно 1000 шагам) жизни популяции из 1000 рыб в озере из 200 участков. Наша программа выводит в конце каждого жизненного цикла численность живности во всём водоеме — карасей, карасих и икринок. Также в ходе работы она демонстрирует поло-возрастную пирамиду — диаграмму численности рыб в зависимости от пола и возраста.

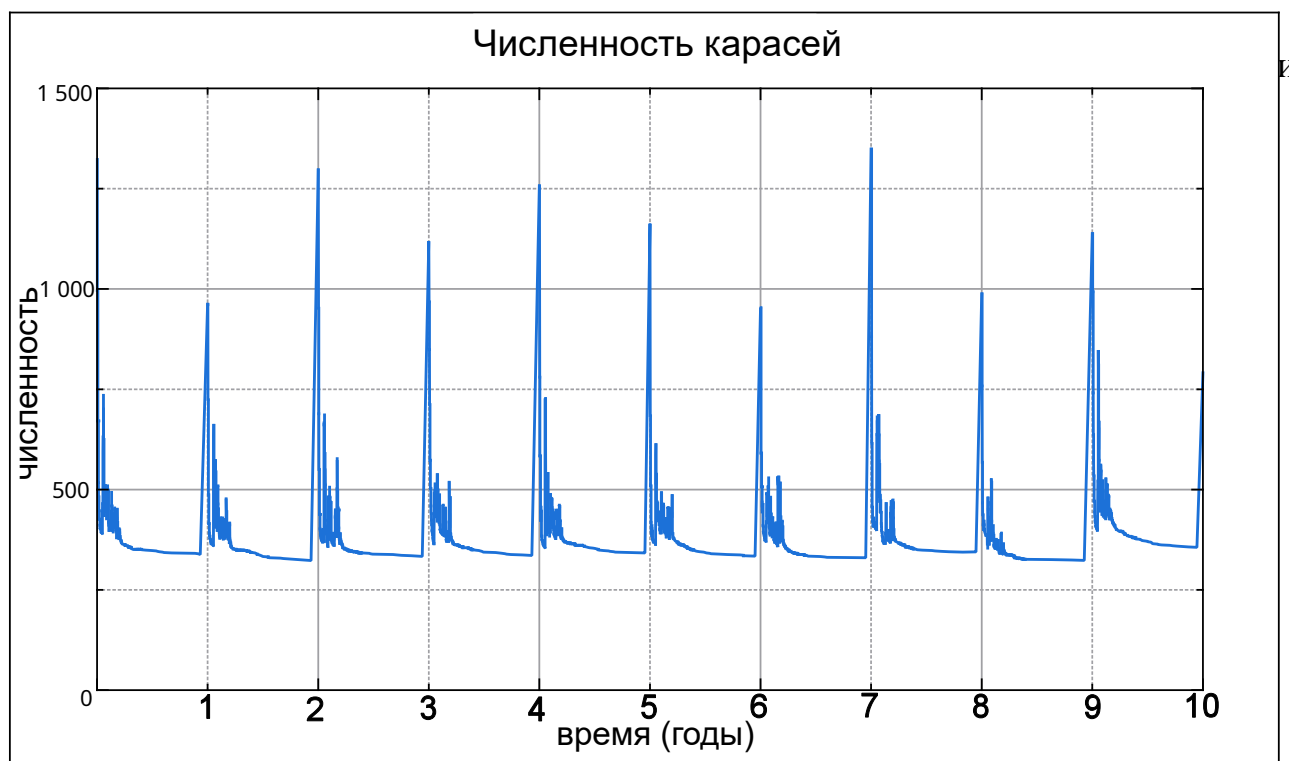


Рис. 1. Динамика численности карасей.

На рис.1 мы приводим график зависимости численности карасей от времени на промежутке 10 лет. На графике четко видна сезонность жизни рыб. В широких



диапазонах значений параметров (размер озера, количество корма, живучесть / плодовитость рыб) наша модель показывает стабильное поведение, т. е. стартовая популяция рыб не вымирает, а через некоторое время её численность колеблется возле некоторого среднего значения.

У нашей модели есть важные параметры – уровень пищи и размер озера. Их изменение вызывает ожидаемые изменения численности популяции: чем больше корма (при одном и том же размере озера), тем больше рыб; чем больше озеро (при фиксированном общем количестве корма!), тем меньше рыб, так как корм «размазан» по озеру, и рыбам надо тратить энергию на его поиск. Примеры таких зависимостей приведены на рис. 2.

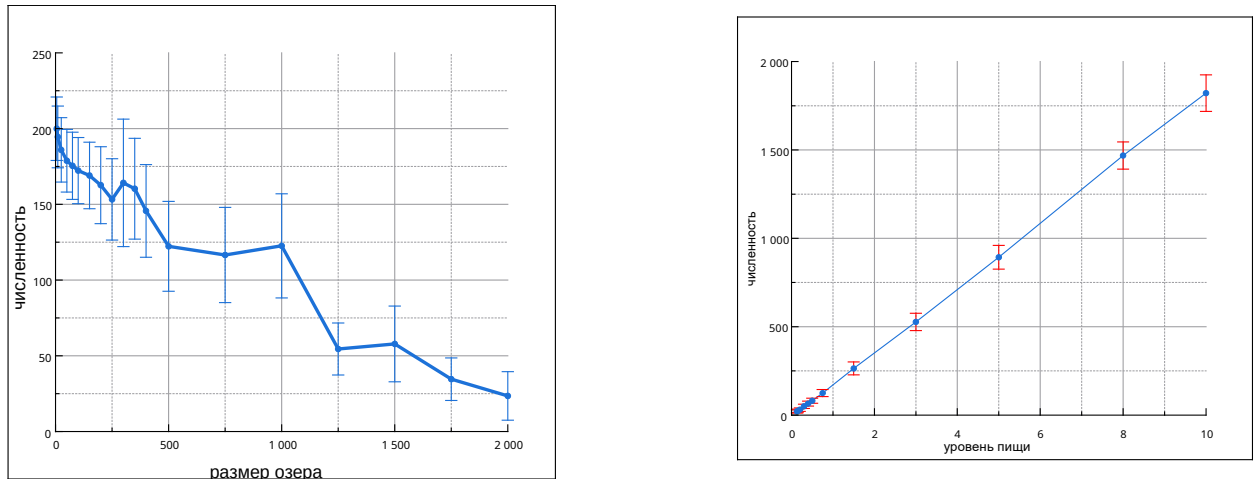


Рис. 2. Поведение модели в зависимости от параметров (размер озера и количество пищи).

Следующий шаг в развитии модели — ввести в водоём хищника (щуку). Жизненный цикл хищной рыбы отличается от травоядной лишь в вопросе питания — щуки едят карасей. Караси питательнее, чем трава (животная пища). Когда щука съедает карася, всё здоровье карася переходит в ХП щуки (с некоторым коэффициентом — эффективность охоты). С возрастом у щуки получается хуже есть карасей.

Введение в модель хищников оказалось не таким простым делом. Пока мы специально не ограничили охотничьи навыки щуки в отношении карасиных мальков, совместная популяция рыб гарантированно вымирала — сначала щуки, сколь мало бы их ни было, очень быстро размножились и съедали всех карасей, а потом закономерно вымирали сами. Можно сказать, что наша модель подтверждает утверждение о том, что стратегия «суперхищника» на большом промежутке времени всегда проигрышная!

Скорректированная модель показывала, что стартовая популяция рыб (карасей и щук) опять же при довольно широких значениях параметров и разумных стартовых численностях за некоторое количество жизненных циклов приходила к устойчивой популяции рыб. Но при этом эта устойчивая популяция не была неизменной — всё время происходили колебания численности рыб около некоторых средних значений. При этом на ещё бóльшем временном масштабе сами эти средние значения численности тоже менялись, порой скачкообразно, по некоторому множеству (аттрактор).

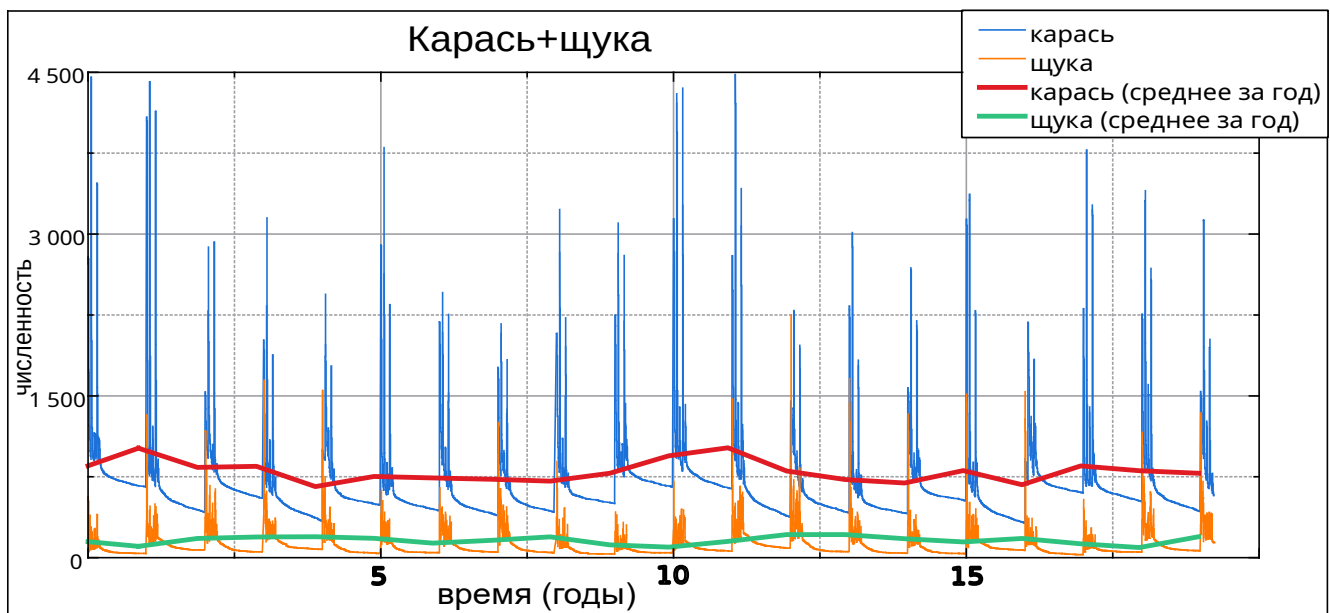


Рис. 3. Совместная эволюция популяции карасей и щук.

На рис. 3. изображена зависимость численности карасей (*синие*) и щук (*оранжевые*) от времени на промежутке 20 лет. Также мы приводим усредненные по году численности карасей и щук (*красный и зеленый* графики). Мы наблюдаем согласованное изменение численности – чем меньше щук, тем больше карасей, и наоборот. Причем эта согласованность численностей имеет некоторое запаздывание, как и должно быть в жизни (сначала плодятся караси, потом от избытка пищи плодятся щуки, которые съедают карасей, пищи становится мало, и щук тоже становится меньше). На следующем графике (рис. 4.) приведена среднемесячная численности популяции за 3 года.

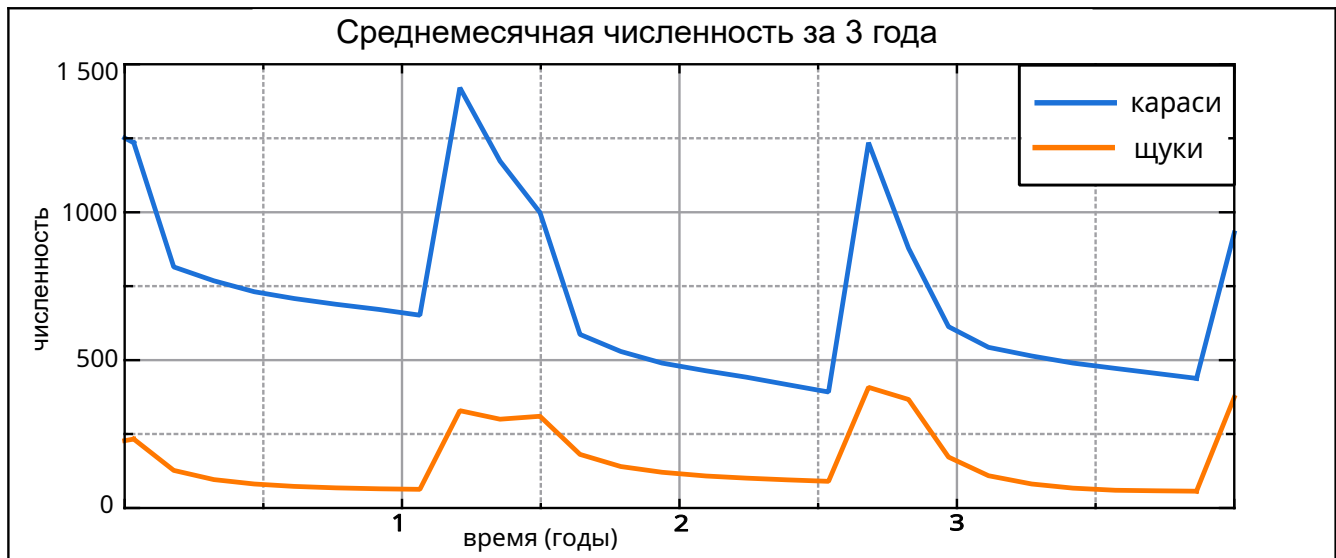


Рис. 4. Среднемесячная численность карасей и щук за 3 года.

На рис. 5 приведено фазовое пространство модели. На нем по одной оси отложена численность карасей, по другой — щук. На каждом шаге программа выдает эти два числа, и они дают нам точку *светло-зеленого* цвета на фазовом пространстве. Чем точки гуще, тем чаще система находится в таком состоянии. Таких точек 20.000 (количество шагов работы программы). Чем цвет гуще, тем точек в этой области больше (система чаще бывает в том состоянии). Точки *зеленого* и *красного* цвета — те же данные, только усредненные по месяцам и годам соответственно. Можно сказать, что красные точки изображают множество-

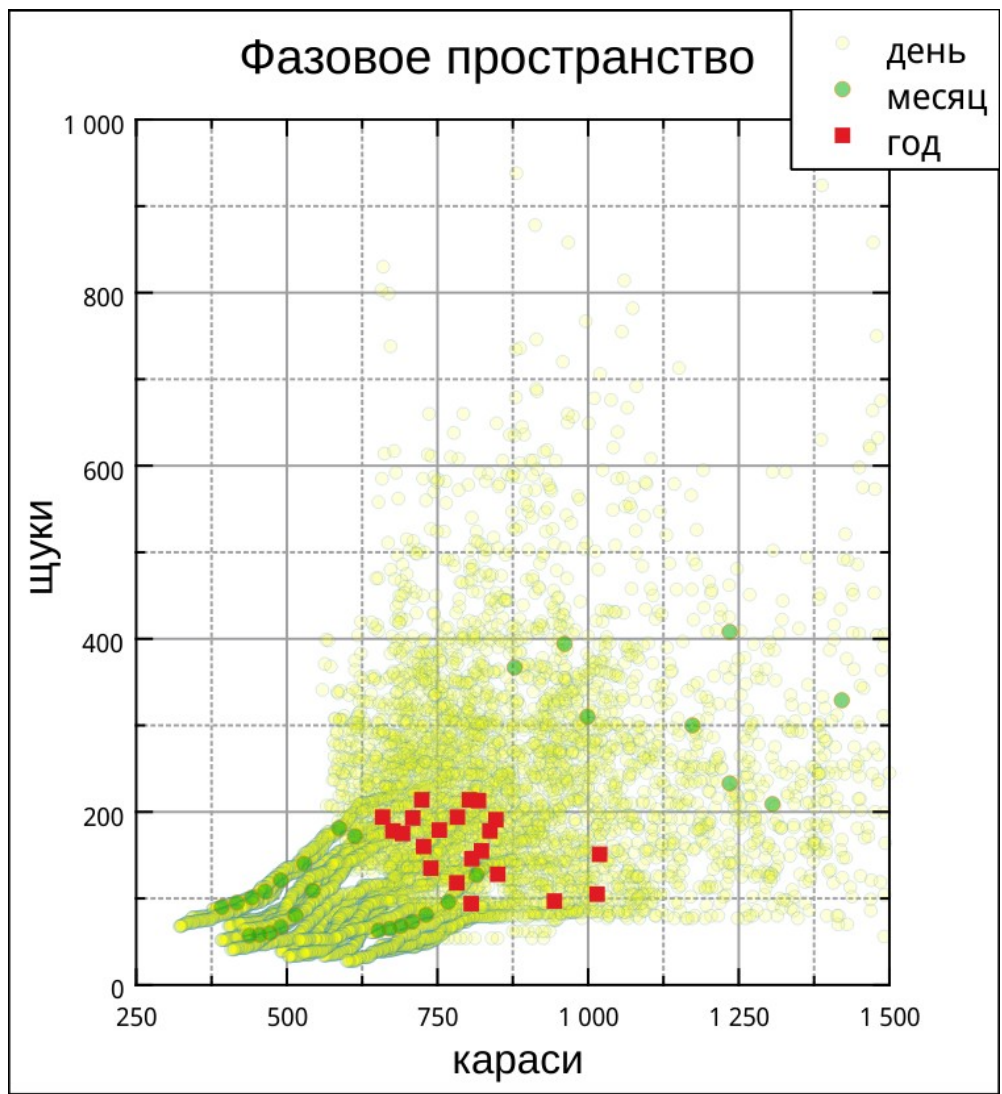


Рис. 5. Фазовое пространство модели.

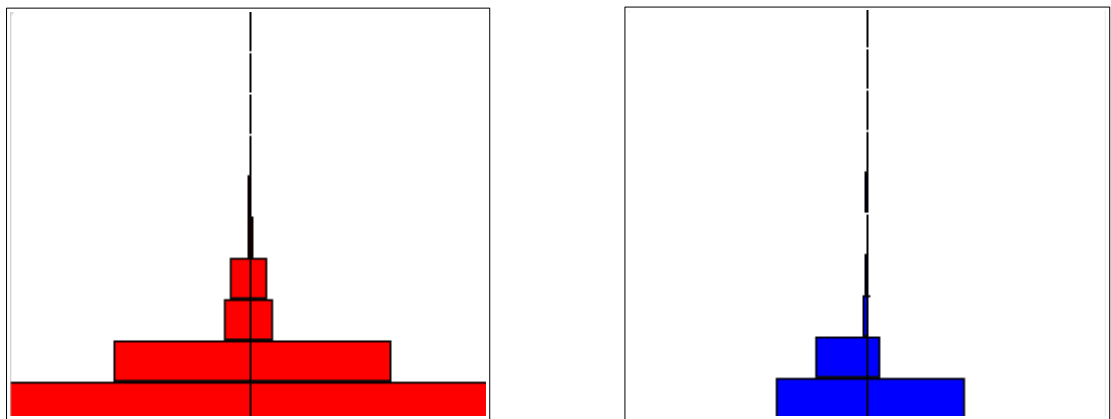


Рис. 6. Половозрастные пирамиды карася (красный) и щуки (синий).

аттрактор нашей модели — те состояния, в котором находится наша система на большом масштабе времени. Также приведены финальные половозрастные пирамиды популяций. Видно, что до старости практически не доживают ни караси, ни щуки. И чем старше рыба, тем меньше у нее шансов выжить.

Чтобы оценить реалистичность нашей модели, мы приводим графики биомассы плотвы (травоядная рыба) и щуки (хищник) в Псковско-Чудском озере. В отличие от нашей простой модели, мы видим на них значительные изменения численности в зависимости от года. Наша модель, очевидно, не учитывает многих природных и антропогенных факторов.

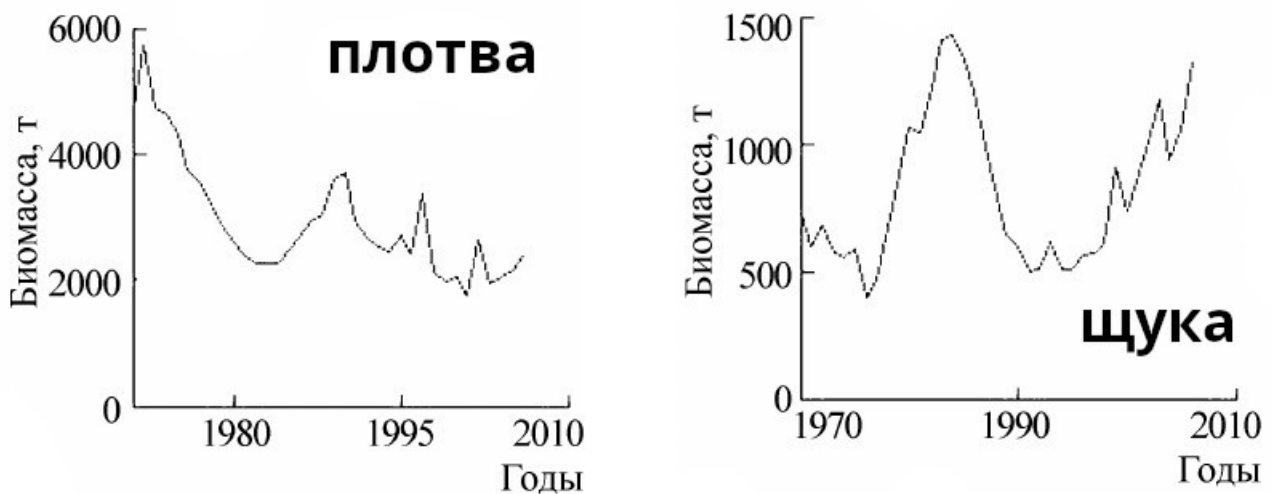


Рис. 7. Динамика общей биомассы плотвы и щуки Псковско-Чудского озера. Графики взяты из работы [4].

Созданная нами модель, несмотря на скромные объёмы данных и упрощённые правила, которыми мы описали жизненный цикл наших рыб, показывает применимость мультиагентного подхода к программному моделированию численности популяций в реальном водоёме. Продолжением исследования могло бы стать увеличение массивов данных, уточнение параметров

модели, введение внешних условий (например, температура воды в водоёме, экологические факторы и т. п.).

Известно, что с XVIII века на протяжении более двух столетий главным объектом рыболовства на Псковском озере был снеток. В связи с потеплением условия для жизни снетка ухудшались, и к концу XX века его численность резко сократилась. Вместе с тем значительно (в 137 раз за 20 лет) выросла численность судака. Популяции этих рыб взаимосвязаны, т. к. снеток является пищей для судака. Было бы интересно рассчитать динамику популяций этих рыб с помощью нашей модели и оценить перспективы рыболовства на Псковском озере.

### **3. Выводы.**

В процессе работы мы познакомились с математическим моделированием в биологии. Одним из перспективных и быстро развивающихся направлений в этой области является мультиагентное моделирование. На основе этого подхода нами построена математическая модель жизни травоядных рыб в замкнутом водоёме. Модель реализована в виде компьютерной программы на языке C++. Изучено поведение модели в зависимости от различных параметров. Оно является устойчивым и предсказуемым. Мы усложнили модель, добавив в неё хищных рыб. Поведение усложнённой модели также оказалось устойчивым — численность популяции колебалась около некоторых средних значений. Мы сопоставили полученные результаты с реальными данными из научного исследования динамики популяции рыб в Псковско-Чудском озере.

## Использованная литература

1. Горбань А. Н., Хлебопрос Р. Г. Демон Дарвина. Идея оптимальности и естественный отбор. – Москва: Наука, 1988. – 207 с.
2. Базыкин А. Д. Математическая биофизика взаимодействующих популяций. — М.: Наука, 1985. — 181 с.
3. Дмитриев В. Л. Мультиагентный подход к моделированию биологических систем на примере популяций мелких рыб и акул // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 6, Ч. 1 [Электронный ресурс]. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2014/06/34852> (дата обращения: 28.01.2023).
4. А.Е. Бобырев, В.А. Бурменский, Е.А. Криксунов, А.Б. Медвинский, М.М. Мельник, Н.И. Нуриева, А.В. Русаков. Анализ колебаний численности популяции промысловых рыб Псковско-Чудского озера // Биофизика , 2012, том 57, вып. 1, с. 140–145
5. Майер Р. В. Компьютерное моделирование: учеб.-метод. пособие для студентов педвузов. – 2014. – 531 с.
6. Code-Live.ru. Портал о программировании. – URL: <https://code-live.ru/> (дата обращения: 12.12.2022)