

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Б.Н.ЕЛЬЦИНА**

Диссертационный совет Д.05.14.488

На правах рукописи
УДК:519.6(575.2)(043.3)

Косимов Исмоил Латипович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ
МАКРОФИТНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ РЫБОВОДНОГО ПРУДА С БЕЛЫМ АМУРОМ**

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бишкек-2016

Работа выполнена на кафедре информатики
Таджикского национального университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Комилов Файзали Саъдуллоевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, с.н.с.
Пресняков К.А.

кандидат физико-математических наук
Дуйшоков К.Д.

Ведущая организация: Институт математики им. А. Джурасва АН РТ

Защита состоится « 29 » апреля 2016 г. в 13:00 часов на заседании Диссертационного совета Д.05.14.488 в Институте автоматизации и информационных технологий Национальной Академии Наук Кыргызской Республики по адресу: 720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265 «а», ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национальной Академии Наук Кыргызской Республики по адресу: 720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265 «а».

Автореферат разослан «28» марта 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.ф.-м.н.



Г.К. Керимкулова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Начало XXI столетия ознаменовалось интенсивным развитием и внедрением во все сферы общества информатики, компьютерной техники и информационных технологий. Это подтверждает, что процесс информатизации интенсифицируется, завершается этап неуправляемой информатизации. Управляемая составляющая, кроме прочих областей, реализуется и в обслуживании пресноводных экосистем.

Создание управляемых водных экологических систем актуально и для оптимизации биологических процессов рыбоводного пруда. Высокой эффективности прудового хозяйства можно достигнуть лишь при выборе оптимальных значений таких управляющих параметров, как внесение кормов, удобрений и реаэрация водоёма при оптимальном выборе характеристик посадочного материала. Такие управления, несомненно, воздействуют на всю экосистему пруда, вызывая порой непредсказуемые и далеко не всегда желательные изменения в экодинамике водоёма. Для учёта последствий использования тех или иных режимов управления и оценки возможных превращений во всем комплексе причинно-следственных связей в экосистеме трудно обойтись без привлечения методов математического моделирования. Это и определяет особую актуальность исследуемой темы.

Степень научной разработанности проблемы и методологическая основа исследования. Современное состояние изучения проблемы информатизации характеризуется наличием в научной литературе работ, в которых описываются внедрение информационных технологий, неотъемлемой частью которых являются методы компьютерного моделирования управляемых объектов, процессов и систем.

Среди исследователей водных экосистем большой резонанс получили комплексные исследования объектов с применением современных технологий математического и компьютерного моделирования и вычислительного эксперимента. В вычислительных экспериментах реализованы эффективные методы и алгоритмы в виде комплексов проблемно-ориентированных программ.

Формирование современных представлений о принципах и подходах к математическому моделированию экосистем водных объектов связано с именами известных зарубежных и отечественных исследователей, разработки которых составили методологическую основу нашего исследования: Моисеев Н.Н., Свирежев Ю.М., Воинов А.А., Логофет Д.О., Тарко А.М., Алексеев В.В., Воронкова О.В., Лукьянов Н.К., Тонких А.П., Горстко А.Б., Домбровский Л.В., Меншуткин В.В., Винберг Г.Г., Анисимов С.И., Одум Ю., Jorgensen S.E., Leonov A.V., Chen C.W., Orlob G.T., Straskraba A., Di Toro D.M., Ikushima I., Park R.A., Steele J.H., Vollenweider R.A., Volterra V., Юниси М.К., Комилов Ф.С., Наврузов С.Н., Шарапов Д.С. и др.

К сожалению, ввиду сугубой специфичности экосистем водоёмов использование уже разработанных, пусть даже весьма детальных моделей, как правило, бывает невозможно. С одной стороны, конкретная экосистема обладает особенностями, которые оказываются не предусмотренными даже в рамках детализированных моделей (специфические виды рыб, особенности уровня режима или важная роль макрофитов). С другой стороны, поскольку пока слабо развита стандартная схема экспериментального изучения и мониторинга водоёмов, построение модели оказывается ограниченным узкими рамками конкретных массивов данных для конкретного водоёма.

Отличительная черта разработанной нами компьютерно-математической модели макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром (Комилов, Косимов, 2012-2014) от известных работ по моделированию экосистем других водоёмов (Комилов, Шарапов, 2000; Leonov, 1985; Voinov, Svirezhev, 1984; Воинов, Воронкова, Лукьянов, Свирежев, 1984; Лукьянов, Свирежев, 1981; Горстко, 1976; Jorgensen, 1976; Меншуткин, Сорокин, 1975; Straskraba, 1973 и др.) прежде всего, проявляется в способе описания эффектов распределения веществ между водной толщью и седиментами.

В нашей модели впервые для рыбоводных прудов южной зоны Таджикистана в качестве особого объекта исследования рассматривается белый амур – одна из ценных, промысловых растительноядных рыб. Проанализирован процесс зарастания в рыбоводном пруду высшей водной растительности и учтено влияние биомассы макрофитов (излюбленного корма белого амура) на другие компоненты экосистемы. Для учёта элективности питания рыб здесь вводится функция вероятности потребления заменяющего или вынужденного кормов. Кроме элективности питания, для рыб также учитывается зависимость усвоения пищи от величины рациона.

Другой отличительной особенностью нашей имитационной модели в сравнении с подобными работами по моделированию экосистем прудов является обращение особого внимания на роль бактерий в процессах химизма воды и её газового режима. В известных работах школы Ю.М. Свирежева по математическому моделированию экосистем как водохранилищ и озёр (Воинов и др., 1981; Лукьянов, Свирежев, 1984; Свирежев и др., 1984; Воинов, Комилов, 1985; 1986), так и рыбоводных прудов (Svirezhev, Krysanova, Voinov, 1984; Voinov, Svirezhev, 1984) чаще всего функция бактериопланктона отождествляется с детритом или подключается к детриту, тогда как роль бактерий, населяющих водную толщу и донные отложения, не тождественны функциям детрита. В последних работах таджикского учёного Ф.С. Комилова и его учеников (Комилов, 1990-2014; Комилов и др., 1992-2011; Комилов, Шарапов, 2000-2004; Комилов, Косимов, 2012-2014) бактериопланктон выделяется как самостоятельная переменная, так как помимо создаваемой им биомассы, которая включается в биотическую цепь, огромна роль бактерий и в процессах, которые существенно влияют на химизм воды и её газовый режим.

Объект исследования – макрофитная экосистема рыбоводного пруда с белым амуром.

Предмет исследования – математическая модель макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром.

Цель исследования – выявление закономерностей функционирования макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром.

Задачи исследования:

- ✓ изучение белого амура как особого объекта исследования макрофитной экосистемы рыбоводного пруда;
- ✓ изучение жизненного цикла макрофитов экосистемы рыбоводного пруда;
- ✓ изучение закономерностей взаимодействия водной толщи и седиментов макрофитной экосистемы рыбоводного пруда;
- ✓ разработка концептуальной модели макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром;
- ✓ разработка способа учёта процессов, связанных с жизненными циклами погружённых и полупогружённых макрофитов в математической модели;
- ✓ разработка математической модели динамики макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений – инструмента для изучения закономерностей функционирования экосистемы;
- ✓ создание эффективного компьютерного инструмента прогнозирования динамики экосистемы рыбоводного пруда путём идентификации и верификации программно реализованной математической модели;
- ✓ исследование закономерностей эволюции макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром на базе созданного компьютерного инструмента;
- ✓ разработка оптимального управления функционированием макрофитной экосистемы рыбоводного пруда для достижения максимальной продуктивности белого амура.

Методы исследования:

- ✓ системный анализ – для исчерпывающего описания компонентов макрофитной экосистемы рыбоводного пруда и связей между её водной толщью и седиментами;
- ✓ теория дифференциальных уравнений – для разработки математической модели макрофитной экосистемы рыбоводного пруда;

- ✓ численный метод Рунге-Кутты-Мерсона – для решения системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений на компьютере;
- ✓ объектно-ориентированный язык программирования Borland Delphi-9 – для реализации математической модели на компьютере;
- ✓ метод идентификации – для настройки математической модели на основе экспериментальных данных;
- ✓ метод верификации – для проверки работоспособности программно реализованной математической модели на основе экспериментальных данных;
- ✓ имитационное моделирование – для создания эффективного компьютерного инструмента прогнозирования динамики экосистемы;
- ✓ информационная технология – для автоматизации обмена данными между электронной таблицей MS Excel-2010 и объектно-ориентированным языком Borland Delphi-9;
- ✓ метод сценариев – для исследования закономерностей эволюции экосистемы на базе созданного компьютерного инструмента;
- ✓ компьютерный эксперимент с привлечением теории оптимального управления – для достижения максимальной продуктивности белого амура при минимальных затратах.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует следующим областям исследования паспорта специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

- ✓ **Пункт 1.** Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений, перечисленных в формуле специальности.
- ✓ **Пункт 5.** Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.
- ✓ **Пункт 6.** Комплексное исследование научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.
- ✓ **Пункт 9.** Разработка систем имитационного моделирования.

Работа над исследованием осуществлялась в несколько взаимосвязанных этапов:

Основной базой исследования являлись экосистемы прудов рыбного хозяйства Джамиского района Хатлонской области Республики Таджикистан (РТ).

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается:

- ✓ методологией системного подхода;
- ✓ научной концепцией компьютерной диагностики;
- ✓ опорой на теоретические и эмпирические методы исследования;
- ✓ анализом условий и результатами экспериментальной работы;
- ✓ сочетанием комплекса методов, адекватных задачам каждого этапа исследования;
- ✓ личным опытом работы автора в качестве модельера.

Научная новизна исследования:

- ✓ впервые для исследования и прогнозирования динамики нагульных рыболовных прудов южного региона Таджикистана построена компьютерно-математическая (имитационная) модель, которая кроме двух известных видов рыб – белого толстолобика и карпа, также учитывает *макрофитную* (растительную) *рыбу* – *белого амура*;
- ✓ впервые в модельной форме *проанализирован процесс зарастания прудов* южной зоны Таджикистана высшей водной растительностью – излюбленным кормом белого амура;
- ✓ впервые с использованием математической модели *изучена роль микробиологических процессов* в высокопродуктивных экосистемах рыболовных прудов и более совершенных способов учёта фитопланктона и бактерий в её соответствующей компьютерной модели, рассмотрены особенности учёта в модели биогенных и органических веществ, газового режима и эффекты распределения веществ между водной толщей и седиментами прудов;

- ✓ в виде проблемно-ориентированного программного комплекса получен инструмент исследования (имитатор) для управления и прогнозирования макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром с целью достижения высокой рыбопродуктивности;
- ✓ предложена *модифицированная методика настройки и использования инструмента* управления и прогнозирования макрофитной экосистемы рыбоводного пруда в виде соответствующих численных методов идентификации и верификации математической модели;
- ✓ разработанная имитационная модель *адекватно воспроизводит процессы*, происходящие в экосистемах рыбоводных прудов.

Теоретическая значимость исследования:

- ✓ для изучения, реализации и прогнозирования рыбоводных прудов *построена модифицированная имитационная модель*, учитывающая растительную рыбу – белого амура;
- ✓ в модельной форме получило своё *дальнейшее развитие исследование процесса зарастания прудов* высшей водной растительностью – излюбленным кормом белого амура;
- ✓ с помощью разработанной компьютерно-математической модели *выявлена роль микробиологических процессов* в высокопродуктивных экосистемах рыбоводных прудов;
- ✓ построенные *проблемно-ориентированные комплексы программ* дали новый толчок в усовершенствовании методов нахождения, вычисления и применения значений параметров и коэффициентов (*идентификация и верификация*) математической модели и их сравнения с имеющимися химико-биологическими экспериментальными данными сложных экосистем;
- ✓ получен *имитатор – инструмент исследования* для изучения, экспериментирования, применения и прогнозирования динамики экосистем рыбоводных прудов при различных вариантах экзогенных параметров.

Практическая значимость исследовательской работы:

- ✓ *разработана обобщённая методика* компьютерно-математического (имитационного) моделирования макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром общего типа. Созданная методика позволяет достаточно оперативно конструировать имитационные модели интересующих нас рыбоводных прудов, используя уже разработанные блоки, схемы, элементы с предварительным их детальным анализом;
- ✓ *создан инструмент исследования – программный комплекс* для управления и прогнозирования макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром;
- ✓ *предложена методика настройки инструмента управления* и прогнозирования макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром;
- ✓ полученные результаты работы можно использовать для количественных и качественных исследований рыбоводных прудов стран Средней Азии и Казахстана.

Апробация результатов исследования выполнялись на всех этапах исследования, полностью отражены в 11 статьях, 5 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Результаты работы докладывались на научных семинарах кафедр «Информатика», «Информационно-коммуникационные технологии», «Моделирование и информационные системы» Таджикского национального университета (ТНУ), внутривузовских, республиканских и международных научных конференциях (2011-2014 гг).

Внедрения основных результатов работы. Основные результаты исследований были использованы Межведомственным отделом по рыбопроизводству Института зоологии и паразитологии АН РТ при изучении биологических основ управления экосистемой рыбоводного пруда, на базе опытного 8-ми гектарного пруда рыбхоза имени А.Джами РТ (1988г.). В настоящее время эти результаты используются в ТНУ при чтении специального курса «Компьютерное моделирование водных экосистем» и в ИПС при чтении специального курса «Имитационное моделирование эколого-экономических систем рыбоводных прудов».

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Концептуальная модель макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром, основанная на описании биогидрохимических круговоротов вещества и изменении биотических и химических элементов, которая кроме двух известных видов рыб – белого толстолобика и карпа, также учитывает растительную рыбу – белого амура.
2. Модифицированная точечная имитационная (компьютерно-математическая) модель динамики макрофитной экосистемы рыбоводного пруда, основанная на концептуальной модели и учитывающая влияние климатических факторов (температура воды и солнечная радиация), биогенную нагрузку, а также управляющие функции, такие как добавления в систему комплекса органических и биогенных веществ, и внесения в пруд растительного корма и кормов заводского приготовления.
3. Алгоритмы поставленных задач и их реализация в виде проблемно-ориентированного комплекса программ – инструмента исследования (имитатор) для изучения, экспериментирования, применения, управления и прогнозирования динамики макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром при различных вариантах экзогенных параметров.
4. Идентификационные и верификационные компьютерные результаты математической модели.
5. Компьютерные сценарные варианты развития динамики макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром, необходимые для оперативного управления и прогнозирования его состояния и учёта последствий различных режимов управления пруда.

Структура диссертации. Полный объем диссертационного исследования составляет 151 страниц компьютерного текста, набранный в текстовом редакторе Microsoft Word, содержит 43 рисунков и 4 таблиц. Нумерация рисунков и таблиц – общая для всех глав работы. Список литературы насчитывает 216 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа состоит из постановки проблемы, пяти глав, выводов, заключения и списка использованной литературы.

Постановка проблемы посвящена общей характеристикой работы, научному обоснованию выбранной темы, поставленной цели и задачам исследования, научной новизне работы, её теоретической и практической значимости, апробации и внедрении полученных результатов. Она также посвящена обзору некоторых математических моделей водных экосистем.

Первая глава посвящена концептуальному моделированию макрофитной экосистемы рыбоводного пруда, где в зависимости от поставленных целей и задач исследования и подбора видового состава рыб приводится обоснование выбора остальных переменных модели и способов их агрегации.

Состояние экосистемы в каждый момент времени определяется концентрацией белого амура (BA), карпа (CR), белого толстолобика (TL), фитопланктона (PT), зоопланктона (ZO), суммарных неорганических фосфора (PW) и азота воды (NW), детрита в воде (DW), бактерии (BK), бентоса (BN), полупогружённого (MT) и погружённого (MR) макрофитов, суммарных неорганических фосфора (PS) и азота (NS) в осадках, а также детрита в осадках (DS), т.е. в концептуальную модель включено 15 фазовых переменных, причем первые 8 из них относятся к водным компонентам экосистемы, 7 остальных – к донным (рис.1).

Входными функциями модели являются температура воды (T) и интенсивность солнечной радиации (I_0) на поверхности водоёма. Включены также пять управляющие функции, характеризующие внесение искусственного корма ($\phi^{CO}(t)$ – комбикорм, $\phi^{CU}(t)$ – куколки тутового шелкопряда, $\phi^{KR}(t)$ – кормовые растения) и минеральных удобрений ($\phi^{SU}(t)$ – суперфосфат, $\phi^{SE}(t)$ – аммиачная селитра).

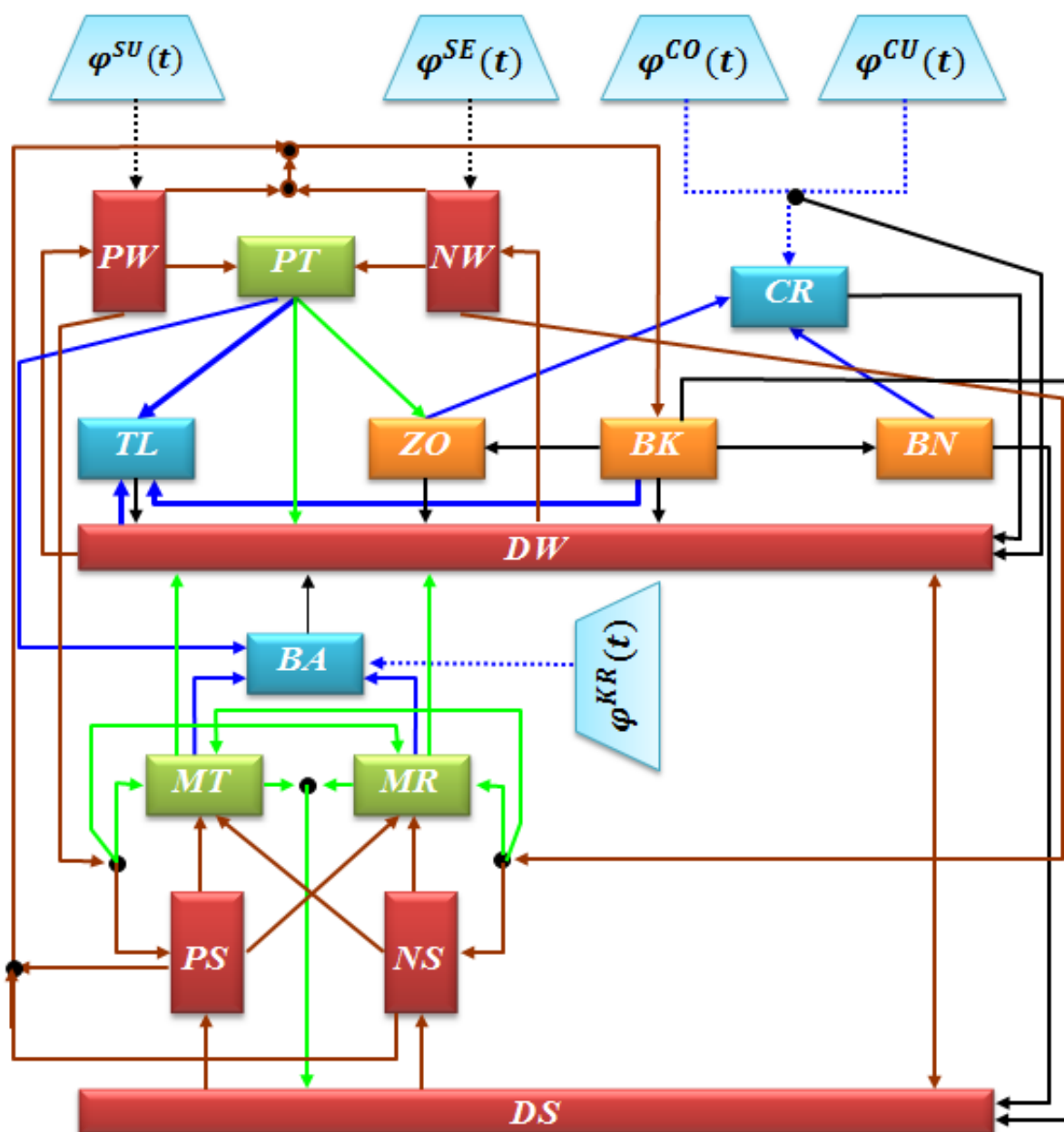


Рис. 1

Вторая глава посвящена математическому моделированию макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром. Здесь описываются функциональные зависимости переменных модели и внешних функций, а также приводятся потоковые дифференциальные уравнения модели.

Переход вещества с одного трофического уровня на другой в модели задается s-образными функциями вида (рис.2)

$$r(i, j) = \frac{\mu_{ij} \cdot i^s}{K_{ij}^s + i^s} \cdot j, \quad (1)$$

описывающими скорости потребления i -го субстрата j -ым организмом, находящимся на следующем трофическом уровне, где μ_{ij} – максимальная скорость потребления (1/сутки), K_{ij} – коэффициент полунасыщения (мг/л).

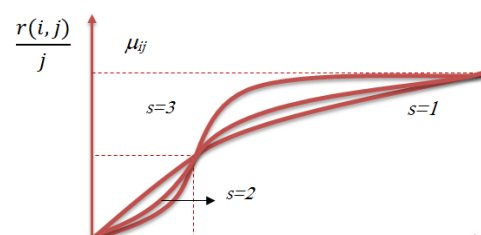


Рис. 2

Потребление биогенных элементов – углерода, азота и фосфора, в экосистеме синхронизировано в соответствии с законами стехиометрии. Соотношение углерода, азота и фосфора в живых организмах поддерживается примерно постоянным:

$PW:NW:CW = \chi^{PW} : \chi^{NW} : \chi^{CW}$, где χ^{PW} – стехиометрический коэффициент (СК) для фосфора, берется как обычно 1, χ^{NW} – СК для азота, по разным источникам равняется от 5 до 16, а χ^{CW} – СК для углерода, берется около 100. Чтобы обеспечить такое соотношение CW , NW и PW в биоте, необходимо выдерживать потоки потребляемых углеродо-, азото- и фосфоросодержащих веществ в таких же отношениях.

Потребление биогенных элементов фитопланктоном. На основе приведённых соображений, потребление фосфора фитопланктоном будет определяться потоком

$$Y_{PT}^{PW} = \min \left\{ r(PW, PT), \frac{1}{\chi_{PT}^{NW}} \cdot r(NW, PT) \right\}, \quad (2)$$

где $r(i, j)$ – функция вида (1), χ_{PT}^{NW} – СК фитопланктона при потреблении азота. Потребление азота фитопланктоном будет пропорционально потреблению фосфора $Y_{PT}^{NW} = \chi_{PT}^{NW} \cdot Y_{PT}^{PW}$.

Для синхронизации потоков азота и фосфора используется следующая процедура:

- вычисление потенциально возможных потоков биогенных веществ по формуле (1);
- определение лимитирующего биогенного вещества по формуле (2);
- пересчет потоков. Потребление нелимитирующего биогена происходит со скоростью, определяемой потреблением лимитирующего биогена.

Углерод, как не ограничивающий продукционного процесса биогенный элемент, не является фазовым переменным модели, но его потребление, как основное по весу составляющей биомассы, учитывается косвенно, из расчёта в количестве $Y_{PT}^{CW} = \chi_{PT}^{CW} \cdot Y_{PT}^{PW}$. Соответствующая доля χ_{PT}^{CW} выпадает при разложении детрита. Итак, в соответствии с принципом лимитирующих факторов потребление биогенных элементов фитопланктоном определяется с помощью следующей формулы:

$$\psi_{PT}(PW, NW, CW) = Y_{PT}^{PW} + \chi_{PT}^{NW} \cdot Y_{PT}^{PW} + \chi_{PT}^{CW} \cdot Y_{PT}^{PW}.$$

Потребление биогенных элементов погружёнными макрофитами определяется их потоками из воды и со дна. Поэтому на основе законов стехиометрии потребление фосфора вычисляется следующим образом:

$$Y_{MR}^{PW+PS} = \min \left[r(PW, MR) + r(PS, MR), \frac{r(NW, MR) + r(NS, MR)}{\chi_{MR}^{NW}} \right],$$

где $r(i, MR)$ – s -образные трофические функции вида (1), $i = PW, PS$ или NW, NS , а χ_{MR}^{NW} – СК погружённого макрофита при потреблении азота. По этой формуле, определяя лимитирующий биогенный элемент, потребляемые потоки азота и углерода погружёнными макрофитами будут заново пересчитываться согласно следующим формулам:

$$Y_{MR}^{NW+NS} = \chi_{MR}^{NW} \cdot Y_{MR}^{PW+PS}, \quad Y_{MR}^{CW+CS} = \chi_{MR}^{CW} \cdot Y_{MR}^{PW+PS},$$

$$\Psi_{MR}(PW, PS, NW, NS, CW, CS) = Y_{MR}^{PW+PS} + \chi_{MR}^{NW} \cdot Y_{MR}^{PW+PS} + \chi_{MR}^{CW} \cdot Y_{MR}^{PW+PS}.$$

При этом предполагается, что не существует предпочтения в потреблении биогенов со дна и из воды.

Для полупогружённых макрофитов характерно преимущественное потребление биогенов со дна, причем, величина этого потока не столько зависит от биомассы зелёной части растений, сколько от биомассы корней, которая не входит в число переменных модели. Чтобы не вводить еще одну переменную, будем предполагать, что биомасса корней пропорциональна доступным биогенам седиментов (функция $q(i)$, $i = PS, NS$ или CS). Потребление биогенов из воды при помощи водных корней начинается лишь при превышении растворёнными питательными веществами определённых пороговых концентраций (функция $p(i, MT)$, $i = PW, NW$ или CW). В итоге потребление биогенных элементов полупогружёнными макрофитами задается следующим образом:

$$Y_{MT}^{PW+PS} = \min \left[p(PW, MT) + q(PS), \frac{p(NW, MT) + q(NS)}{\chi_{MT}^{NW}} \right], \quad Y_{MT}^{NW+NS} = \chi_{MT}^{NW} \cdot Y_{MT}^{PW+PS}, \quad Y_{MT}^{CW+CS} = \chi_{MT}^{CW} \cdot Y_{MT}^{PW+PS},$$

$$\Psi_{MT}(PW, PS, NW, NS, CW, CS) = Y_{MT}^{PW+PS} + \chi_{MT}^{NW} \cdot Y_{MT}^{PW+PS} + \chi_{MT}^{CW} \cdot Y_{MT}^{PW+PS}.$$

Бактерия как деструктор мёртвого органического вещества, т.е. детрита, может находиться как в толще воды экосистемы пруда, так и её седиментах. Функционируя во всем пространстве пруда, бактерия имеет доступ ко всем его биогенным элементам. Поэтому в модели потребление биогенных элементов бактериями тоже определяется их потоками из воды и со дна, т.е. описывается аналогично, также как и для погружённого макрофита, но с другими стехиометрическими коэффициентами

$$\Psi_{BK}(PW, PS, NW, NS, CW, CS) = Y^{PW+PS}_{BK} + \chi^{NW}_{BK} \cdot Y^{PW+PS}_{BK} + \chi^{CW}_{BK} \cdot Y^{PW+PS}_{BK}.$$

При этом заново предполагается, что для бактерий не существует предпочтения в потреблении биогенов со дна и из воды.

Учёт воздействия климатических факторов. Скорости процессов потребления и роста определяются не только количеством доступного субстрата, но физическими условиями среды. Мы предполагаем, что лимитирование светом и температурой можно задать мультипликативными членами в общей функции потока вещества $A_{ij} = f_j(T) \cdot \xi_j(I_0) \cdot \psi_j(\sum i) \cdot (1 - \delta_j)$.

Здесь A_{ij} – поток вещества из i -го блока к j -ый блок (например, из блока фитопланктона к блоку зоопланктона), $\psi_j(\sum i)$ – функция выедания суммарного субстрата (продуцентов, консументов или биогенов, т.е. в частности $\psi_j(\sum i) = r(i, j)$ или $p(i, j)$, или же $q(i)$ и т.д.), δ_j – потери j -го организма на метаболизм, $f_j(T)$, $\xi_j(I_0)$ – функции лимитирования j -го организма температурой и светом (для продуцентов), соответственно ($0 < f_j(T)$, $\xi_j(I_0) \leq 1$), $j = PT, MT, MR, ZO, BK, BN, TL, CR$ или BA , T – температура воды, I_0 – интенсивность солнечной радиации на поверхности пруда.

Температурная функция роста. Зависимость роста организмов от температуры описывается модифицированной функцией Лемана:

$$f_j(T) = \begin{cases} \exp \left[-4,6 \cdot \left(\frac{T_{opt}^j - T}{T_{opt}^j - T_{min}^j} \right)^4 \right], & \text{если } T < T_{opt}^j \\ \exp \left[-4,6 \cdot \left(\frac{T - T_{opt}^j}{T_{max}^j - T_{opt}^j} \right)^4 \right], & \text{если } T \geq T_{opt}^j \end{cases}$$

где T_{opt}^j – оптимальная температура для развития j -го организма, T_{min}^j , T_{max}^j – минимальная и максимальная пределы толерантности j -го организма по температуре, соответственно.

Функцию, описывающую лимитирование роста фитопланктона светом, следуя Стилу (1962), зададим в виде:

$$\xi_{PT}(I_0) = \frac{I_h}{I_{opt}^{PT}} \cdot \exp \left(1 - \frac{I_h}{I_{opt}^{PT}} \right),$$

где I_{opt}^{PT} – оптимальная освещённость для фитопланктона, I_h – освещённость на заданной глубине h .

Для вычисления I_h используется эмпирический закон Бэра-Ламберта об экспоненциальном затухании света с увеличением глубины: $I_h = I_0 \cdot e^{-\nu h}$, где I_0 – суммарная солнечная радиация на поверхности пруда. Коэффициент затухания света – ν , естественно, предположить пропорциональным концентрациям взвешенных в воде веществ – фитопланктона, макрофитов и детрита: $\nu = k_w + k_{pr} \cdot (PT + MR) + k_{dm} \cdot d_{dm} \cdot (DW + MT)$, где k_w – коэффициент затухания в чистой воде, k_{pr} – коэффициент затемнения фитопланктоном – PT и погружённым макрофитом – MR , k_{dm} – коэффициент затемнения детритом – DW и полупогружённым макрофитом – MT , d_{dm} – доля детрита и полупогружённого макрофита, взвешенная в воде.

Для описания лимитирования роста полупогружённых макрофитов светом используется модифицированная формула Стила. В зависимости от роста тростников она работает в двух режимах:

$$\xi_{MT}(I_0) = \begin{cases} \frac{I_h}{I_{opt}^{MT1}} \cdot e^{\left(1 - \frac{I_h}{I_{opt}^{MT1}}\right)}, & \text{если } MT < MT_{cr} \\ \frac{I_0}{I_{opt}^{MT2}} \cdot e^{\left(1 - \frac{I_0}{I_{opt}^{MT2}}\right)}, & \text{если } MT \geq MT_{cr}, \end{cases}$$

где, по-прежнему, I_h вычисляется по формуле Бэра-Ламберта, а I_{opt}^{MT1} и I_{opt}^{MT2} – оптимальные освещённости для роста тростников под и над водой ($I_{opt}^{MT1} \leq I_{opt}^{MT2}$), соответственно и MT_{cr} – критическая концентрация тростников, которая оценивается их биомассой в момент выхода стебля из воды.

Функция, описывающая лимитирование роста погружённых макрофитов светом, является функцией Ди Торо (1971):

$$\xi_{MR}(I_0) = \frac{e}{vh} \left[e^{\left(\frac{I_h}{I_{opt}^{MR}} e^{-vh} \right)} - e^{-\frac{I_h}{I_{opt}^{MR}}} \right],$$

где I_{opt}^{MR} – оптимальная освещённость для роста и развития погружённого макрофита, а остальные коэффициенты и параметры имеют тот же смысл, что и раньше.

Процессы **бактериальной деструкции** аппроксимируются уравнениями химической кинетики 1-го порядка, причем предполагается, что детрит как в воде так и в осадках вновь распадается на азото- и фосфоросодержащие питательные вещества в соответствии с их стехиометрическим содержанием.

Например, скорость протекания процесса бактериального разложения детрита в воде будет описываться формулой:

$$r(DW, BK) = \frac{\mu_{DWBK} \cdot DW^s}{K_{DWBK}^s + DW^s} \cdot BK,$$

где μ_{DWBK} – максимальная скорость разложения детрита в воде бактериями, K_{DWBK} – соответствующая константа полунасыщения.

В данном случае s ($s=2$) можно интерпретировать как количество молекул субстрата, «обрабатываемых» одной молекулой фермента, т.е. одним микроорганизмом одновременно. Скорость протекания процесса бактериального разложения детрита осадков будет описываться аналогичной формулой, но с другими коэффициентами.

На скорости процессов деструкции мёртвого органического вещества существенно влияет температура. Поскольку бактериальные процессы ингибируются температурами практически недостижимыми в условиях естественных водоёмов ($>50-60^\circ C$), то для описания температурной зависимости деструкции мёртвого органического вещества в воде, в этом случае, используется формула Вант-Гоффа:

$$f_{DW}(T) = 2^{\frac{(T-T_0)}{10}},$$

отражающая факт увеличения скорости процессов в два раза при увеличении температуры на $10^\circ C$. Здесь T – температура воды в толще водоёма, T_0 – температура, при которой измерены остальные коэффициенты, входящие в описание процесса. Температурная зависимость процесса деструкции детрита осадков задаётся аналогично.

Скорость разложения детрита воды до фосфора воды определяется следующей формулой:

$$A_{DWPW} = f_{DW}(T) \cdot k_{des}^{DW} \cdot \frac{\chi_{BK}^{PW}}{\chi_{BK}^{PW} + \chi_{BK}^{NW} + \chi_{BK}^{CW} + k_{DS}^{DW}} \cdot r(DW, BK),$$

где k_{des}^{DW} – коэффициент деструкции детрита в воде ($0 < k_{des}^{DW} < 1$), χ_{BK}^{PW} , χ_{BK}^{NW} , χ_{BK}^{CW} – СК бактерий при разложении детрита в воде для фосфора, азота и углерода воды,

соответственно; k_{DS}^{DW} – доля детрита воды выходящего из круговорота в виде труднорастворимых фракций и осевшего на дне водоёма.

Разложения детрита в воде до азота и углерода воды, соответственно, будут:
 $A_{DWNW} = \chi_{BK}^{NW} \cdot A_{DWPW}$, $A_{DWCW} = \chi_{BK}^{CW} \cdot A_{DWPW}$.

Разложения детрита в осадках до фосфора, азота и углерода осадков определяется аналогично, но с соответствующими другими коэффициентами.

Процесс оседания фосфора воды на дно пруда и его смешивания с фосфором осадков описывается формулой $A_{PWP} = k_{sed}^{PW} \cdot PW$, где k_{sed}^{PW} – коэффициент седиментации нерастворимых соединений фосфора воды. Растворение детритного фосфора осадков и его возвращение в круговорот задается формулой $A_{PSPW} = k_{dif}^{PS} \cdot PS$, где k_{dif}^{PS} – коэффициент диффузии фосфора осадков.

Соответствующие взаимопереходы между азотом воды и осадков задаются аналогичными формулами.

Математическое описание питания рыб с переключением. Предполагается, что имеющиеся корма – q_i ($i=1,2,\dots$) упорядочены по предпочтению q_1, q_2, \dots , причем q_1 – концентрация излюбленного корма. Зависимость вероятности потребления i -го корма η_i от

суммарной концентрации кормов $q = \sum_{i=1}^n q_i$ находится по следующим соображениям:

вероятность $\eta_1=1$ при любом наборе q_1, q_2, \dots, q_n , а вероятность перехода на менее предпочтительный корм η_i есть функция концентрации q_{i-1} , т.е. $\eta_i(q_{i-1})$, $i=2,3,4,\dots$. Кривые $\eta_i(q)$, $i=2,3,\dots$ имеют перевернутый s-образный вид, причем $\eta_j < \eta_i$ при $j > i$ и $\lim_{q \rightarrow 0} \eta_i(q) = 1$, $\lim_{q \rightarrow \infty} \eta_i(q) = 0$.

Это означает, что переходный режим не чётко выражен, а охватывает полосу значений q , хотя зависимость η_i от q при больших q кажется сомнительной. Видимо, ближе к реальности зависимость $\eta_2(q_1)$, $\eta_3(q_1, q_2)$, $\eta_4(q_1, q_2, q_3)$ и т.д.

Так, например, для описания переключения толстолобика – TL с питания излюбленным кормом, т.е. фитопланктоном – PT , на питание заменяющего корма, т.е. бактериями – BK в модели используется функция

$$\eta(PT) = \frac{e^{-\lambda_{PT} \cdot (PT - m_{PT})}}{1 + e^{-\lambda_{PT} \cdot (PT - m_{PT})}},$$

где λ_{PT} – параметр, характеризующий крутизну кривой; m_{PT} – коэффициент полуобеспеченности фитопланктоном, т.е. значение PT , при котором $\eta(PT)=1/2$. Тогда потребление бактерий толстолобиком в случае недостатка фитопланктона запишется в виде

$$A_{BKTL} = f_{TL}(T) \cdot \min\{[r(PT_{cr}, TL) - r(P, TL)], r(BK, TL) \cdot \eta(PT)\} \cdot (1 - \delta_{TL}),$$

где PT_{cr} – критическое значение фитопланктона, при котором толстолобик переходит на питание бактериями. Разность двух трофических функций под знаком минимума обеспечивает ограничение скорости роста рыб так, чтобы она была не выше той, которая достигнута на излюбленном корме (при $PT=PT_{cr}$). При нехватке бактерий толстолобик переходит на питание вынужденным кормом, т.е. детритом – DW :

$$A_{DWT} = f_{TL}(T) \cdot \min\{\min\{[r(PT_{cr}, TL) - r(P, TL)], r(BK, TL) \cdot \eta(PT)\} - \min\{[r(BK_{cr}, TL) - r(BK, TL)] \cdot \eta(PT), r(DW, TL) \cdot \eta(BK) \cdot \eta(PT)\}\} \cdot (1 - \delta_{TL}).$$

Этот процесс может продолжаться и дальше. В этом случае переключение – двухступенчатое, трехступенчатое и т.д. Потребление излюбленного корма, т.е. фитопланктона толстолобиком представляется в виде $A_{PTTL} = f_{TL}(T) \cdot r(P, TL) \cdot (1 - \delta_{TL})$.

Выделение продуктов **метаболизма** и переход их в детрит в модели представлен следующим образом (на примерах фитопланктона, бентоса и толстолобика):

$$A_{PTDW}^1 = (A_{PWPT} + A_{NWPT} + A_{CWPT}) \frac{\delta_{PT}}{(1 - \delta_{PT})}, \quad A_{BNDS}^1 = A_{BKBN} \frac{\delta_{BN}}{(1 - \delta_{BN})}, \quad A_{TLDW}^1 = (A_{PTTL} + A_{BKTL} + A_{DSTL}) \frac{\delta_{TL}}{(1 - \delta_{TL})},$$

где δ_{PT} , δ_{BN} , δ_{TL} – соответствующие коэффициенты метаболизма.

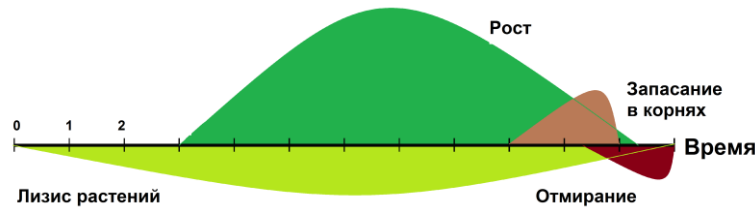
Кроме того, для рыб учитывается зависимость усвоения пищи от величины рациона. Так, например, при обильном питании толстолобика пища заглатывается непрерывно и проходит через кишечник с такой быстротой, что лишь 30-40% ее усваивается, тогда, как при

умеренном питании усваивается в 2 раза больше (Svirezhev et al., 1984): $A_{TLDW}^2 = R_{TL}^2 \frac{\delta_{TL}^S}{R_{TL}^{max}}$, где

$R_{TL} = A_{PTTL} + A_{BKTL} + A_{DWTTL}$, R_{TL}^{max} – максимальный рацион для толстолобика, δ_{TL}^S – суммарный метаболический параметр для толстолобика.

Смертность организмов, жизнедеятельность которых проходит в толще воды и их переход в детрите воды задаётся линейной функцией биомассы или концентрации этих живых объектов: $A_{iDW}^3 = k_i^{cm} \cdot i$, где k_i^{cm} – коэффициент смертности i -го организма, живущего в толще воды $i = PT, ZO, BK, TL, CR$ или BA . Смертность донных организмов, таких как бентос и бактерий, на дне аналогично задается линейной функцией их биомассы с той лишь разницей, что они после гибели превращаются в детрит седиментов.

Предполагается, что **жизненный цикл макрофитов** в экосистеме происходят согласно следующей схеме:



Продукционный процесс (рост) для всех продуцентов, в общем, и для макрофитов, в частности, лимитируется биогенными элементами, согласно принципу лимитирующих факторов, а также температурой и солнечным светом. **Лизис** растений, так же как и смертность для остальных живых организмов, считается пропорциональным концентрации (биомассе) макрофитов, т.е. задается функцией $A_{iDW}^{liz} = k_i^{liz} \cdot i$, где k_i^{liz} – коэффициент автолиза i -го организма ($i = MT, MR$).

Начало процесса **запасания биогенов в корнях** (а в нашем случае в детрите дна) определяется температурой и вычисляется по следующей формуле:

$$f_i^{zp}(T) = \begin{cases} \frac{1}{T} - \Theta_1 & \text{при } T < T_{min}^{zp} \\ 0 & \text{при } T_{min}^{zp} \leq T < T_{max}^{zp} \\ \frac{1}{T_{cr}^{zp} - T} - \Theta_2 & \text{при } T \geq T_{max}^{zp}, \end{cases}$$

где T – температура воды, T_{min}^{zp} и T_{max}^{zp} – минимальная и максимальная температуры, при которых макрофиты начинают запасать биогенные элементы в корнях, T_{cr}^{zp} – некоторая критическая температура ($T_{cr}^{zp} > T_{max}^{zp}$), при которой макрофиты запасают биогены с бесконечной скоростью, $\Theta_1 = 1/T_{min}^{zp}$ и $\Theta_2 = 1/(T_{cr}^{zp} - T_{max}^{zp})$. Начало процесса **отмирания макрофитов** описывается аналогично, но с другими критическими температурами.

На основе диаграммы потоков веществ (рис.1) и с учётом вышеуказанных соображений написаны потоковые дифференциальные уравнения модели:

$$\begin{aligned} dBA/dt &= A_{MTBA} + A_{MRBA} + A_{PTBA} - A_{BADW} + \gamma \cdot \phi^{KR}(t) \cdot BA \\ dCR/dt &= A_{BNCR} + A_{ZOCR} - A_{CRDW} + [\alpha \cdot \phi^{CO}(t) + \beta \cdot \phi^{CU}(t)] \cdot CR \\ dTL/dt &= A_{PTTL} + A_{BKTL} + A_{DWTTL} - A_{TLDW} \\ dPT/dt &= A_{PWPT} + A_{NWPT} + A_{CWPT} - A_{PTZO} - A_{PTTL} - A_{PTBA} - A_{PTDW} \\ dBN/dt &= A_{BKBN} - A_{BNCR} - A_{BNDS} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
dBK/dt &= A_{PWBK} + A_{NWBK} + A_{CWBK} + A_{PSBK} + A_{NSBK} + A_{CSBK} - A_{BKZO} - A_{BKBN} - A_{BKDW} - A_{BKDS} - A_{BKTL} \\
dZO/dt &= A_{PTZO} + A_{BKZO} - A_{ZOCR} - A_{ZODW} \\
dMT/dt &= A_{PWMT} + A_{NWMT} + A_{CWMT} + A_{PSMT} + A_{NSMT} + A_{CSMT} - A_{MTBA} - A_{MTDW} - A_{MTDS} \\
dMR/dt &= A_{PWMR} + A_{NWMR} + A_{CWMR} + A_{PSMR} + A_{NSMR} + A_{CSMR} - A_{MRBA} - A_{MRDW} - A_{MRDS} \\
dPW/dt &= A_{DWPW} - A_{PWPT} - A_{PWMT} - A_{PWMR} - A_{PWBK} - A_{PWPS} + A_{PSPW} + \varphi^{SU}(t) \\
dPS/dt &= A_{DPS} - A_{PSMT} - A_{PSMR} - A_{PSBK} + A_{PWPS} - A_{PSPW} \\
dNW/dt &= A_{DWNW} - A_{NWPT} - A_{NWMT} - A_{NWMR} - A_{NWNS} + A_{NSNW} + \varphi^{SE}(t) \\
dNS/dt &= A_{DSNS} - A_{NSMT} - A_{NSMR} - A_{NSBK} + A_{NWNS} - A_{NSNW} \\
dDW/dt &= A_{PTDW} + A_{MTDW} + A_{MRDW} + A_{BKDW} + A_{ZODW} + A_{TLDW} + A_{CRDW} + A_{BADW} - A_{DWPW} - A_{DWNW} - A_{DWCW} - \\
&A_{DWTW} - A_{DWDS} + A_{DSDW} \\
dDS/dt &= A_{BKDS} + A_{BNDS} + A_{MTDS} + A_{MRDS} - A_{DPS} - A_{DSNS} - A_{DSCS} + A_{DWDS} - A_{DSDW}
\end{aligned}$$

Здесь α , β – соответственно доли комбикорма и куколки, идущих на потребление карпа, γ – доля кормовых растений, идущий на потребление белого амура.

Третья глава посвящена разработкой и адаптацией численных методов для трансформации математической модели в инструмент по прогнозированию динамики макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром. Математическая модель представляет собой систему 15 нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) первого порядка. Ввиду того, что рыбоводный пруд моделируется в течение 5 месяцев (с 1-го мая по 30-го сентября, т.е. сезон из 150 дней), поэтому система 15 ОДУ рассматривается на интервале времени (t_1 , t_{150}).

Система ОДУ на компьютере решается методом Рунге-Кутты-Мерсона с автоматическим выбором шага, который обеспечивает приближенную оценку погрешности ($R \sim h^5$) на каждом шаге интегрирования. Для решения общей системы необходимо определить значения 172 коэффициентов и параметров, задать входные массивы температур и освещённостей, входные потоки азотных и фосфорных удобрений, а также входные массивы внесения кормов в пруд.

Для идентификации и верификации модели использовались экспериментальные данные Института зоологии и паразитологии АН РТ по биологическим основам управления высокопродуктивной экосистемой опытного 8-ми гектарного нагульного рыбоводного пруда рыбхоза имени А.Джами Хатлонской области Таджикистана за 1986-1987гг (рис. 3).

Под идентификацией математической модели понимают расчёты, проводимые при вычисленных параметрах по экспериментальным данным и фиксированных характеристиках климата или антропогенной нагрузки (например, расчёты для конкретного года – 1986г.), т.е. проведение расчётов для сравнения компьютерных результатов с независимыми массивами экспериментальных данных.

Под верификацией модели, как правило, понимают расчёты, проводимые при фиксированных параметрах (найденных на этапе идентификации), но при изменённых характеристиках климата или антропогенной нагрузки (например, расчёты для другого года – 1987г.), т.е. проведение расчётов для сравнения результатов с независимыми массивами, не использованными при идентификации модели.

На основании литературных данных (Jorgensen et al., 1978; Svirezhev, Krysanova, Voinov, 1984; Комилов, Шарапов, 2000; Комилов, 2010) сначала для всех параметров были определены интервалы их возможного изменения, а для части параметров были непосредственно выбраны их значения. Затем за счёт варьирования параметров модели в заданных пределах их возможного изменения, модельные траектории были максимально



Рис. 3

приближены к результатам экспериментальных наблюдений, т.е. к экспериментальным точкам. В тех случаях, когда измерения проводились с недостаточной частотой, или не давали осмысленной динамической траектории («белый шум»), экспериментальные данные дополнялись при помощи «правдоподобных» экспертных оценок.

Четвёртая глава посвящена программному комплексу (пакету программ) для прогнозирования динамики макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром. Здесь приводятся описания самого программного комплекса – как инструмента исследования имитационной модели экосистемы и методы автоматизации обмена данными между электронной таблицей MS Excel-2010 и объектно-ориентированным языком Borland Delphi-9. Описываются методы алгоритмизации решения задачи, способы программирования математической модели с применением комплекса проблемно-ориентированных программ, методы и формы проведения компьютерных экспериментов.

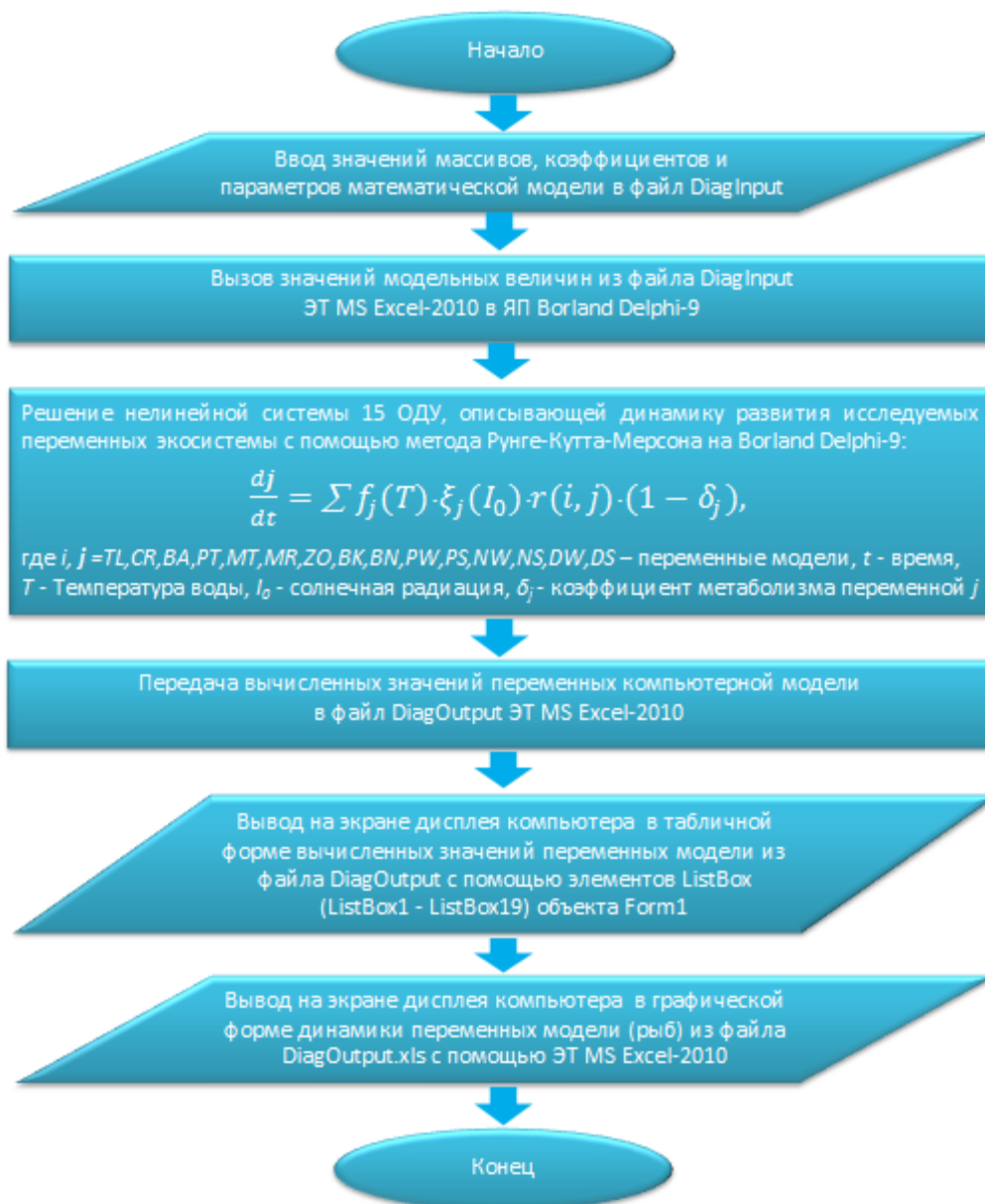


Рис. 4

Математическая модель реализована на языке программирования Borland Delphi-9. В ней, кроме 15 фазовых переменных, содержатся также 23 наименований одномерных массивов данных различной длины и 172 коэффициентов и параметров. Непосредственным результатом работы общей программы математической модели за один сезон (5 месяцев) является массив концентраций 15 переменных модели за 150 дней, всего 2250 чисел.

Процесс присвоения значений массивам данных, коэффициентам и чувствительным параметрам математической модели оформлен в виде специального файла DiagInput, координацией которого с Borland Delphi-9 возложен на сервер по автоматизации Microsoft Excel 2010. Другой специальный файл DiagOutput создан для хранения модельных результатов и их вывода в табличной форме и в виде графиков. Общий алгоритм реализации данного проекта имеет вид, приведенный на рис. 4.

Пятая глава демонстрирует вычислительные эксперименты для выявления закономерностей эволюции экосистемы рыбоводного пруда. Проведены компьютерные экспериментальные расчёты с моделью, а также многочисленные сценарные варианты прогнозирования динамики развития макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром на конечный момент времени. Полученная в результате имитационных экспериментов динамика переменных модели адекватно отражает реальную картину развития экосистемы пруда в течение одного сезона.

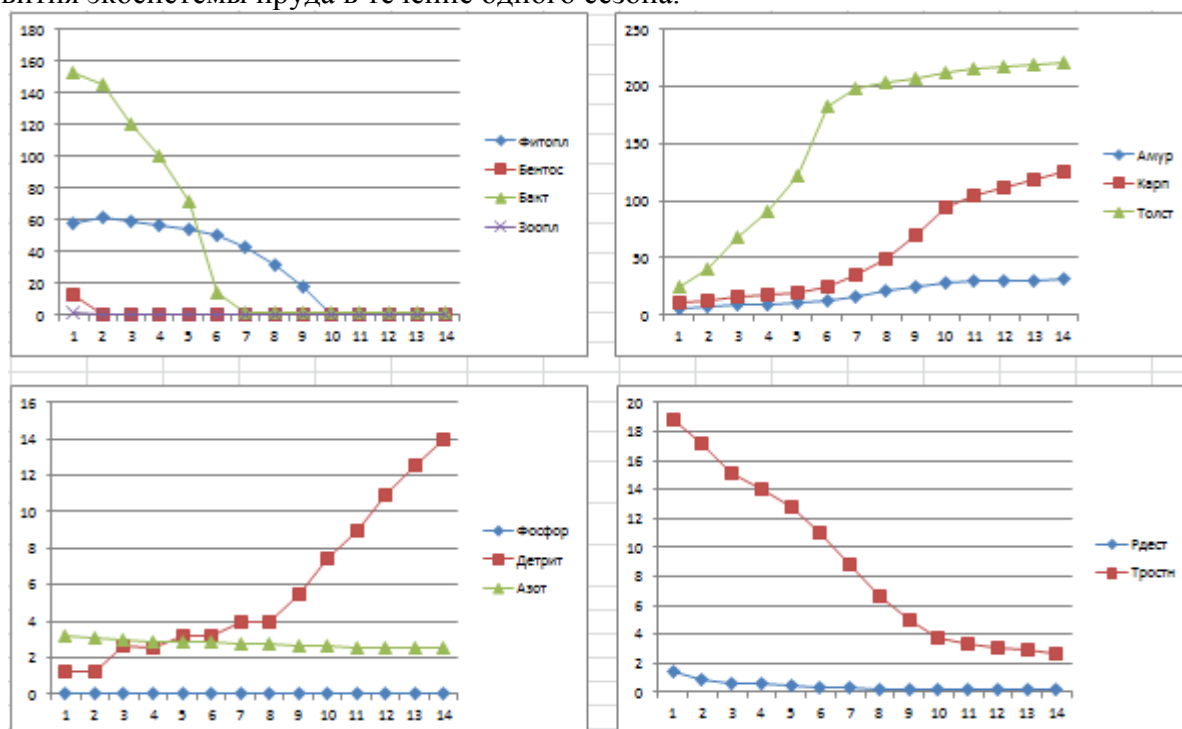


Рис. 5. Динамика переменных экосистемы пруда (Исходный вариант)

Модельная динамика переменных (концентрация в $г/м^3$ или $г/м^2$) экосистемы рыбоводного пруда имени А.Джами, полученная с начальными данными за 1986 год (рис. 5; $CR=7.3$, $TL=18.4$, $BA=5.625$, $PT=0.214$, $MT=25.0$, $MR=20.0$, $ZO=37.99$, $BK=1.88$, $BN=2.5$, $PW=1.0$, $PS=4.0$, $NW=5.0$, $NS=9.0$, $DW=5.0$, $DS=15.0$), динамика рыб (рис. 6) и сравнение кривых рыб с натурными данными (рис. 7) свидетельствует о том, что полученные результаты на компьютере хорошо согласуются с экспериментальными данными.

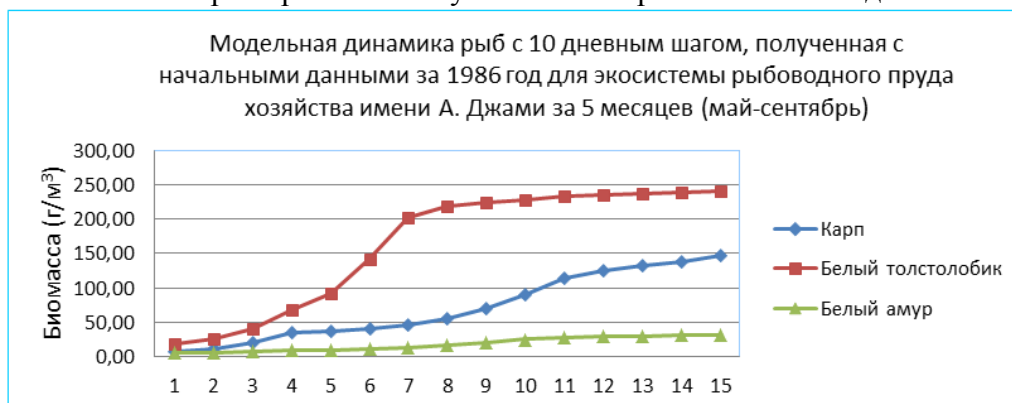


Рис. 6

Начальная концентрация карпа равна $7,3 \text{ г/м}^3$, что соответствует его плотности распределения 3650 шт/га (на 8-ми гектарах всего посажено 29200 шт) со средним весом 20 г . Начальная концентрация белого толстолобика $18,4 \text{ г/м}^3$. Это соответствует посадке 4460 шт/га (общее количество – 35700 шт), средний вес которых $42,2 \text{ г}$.

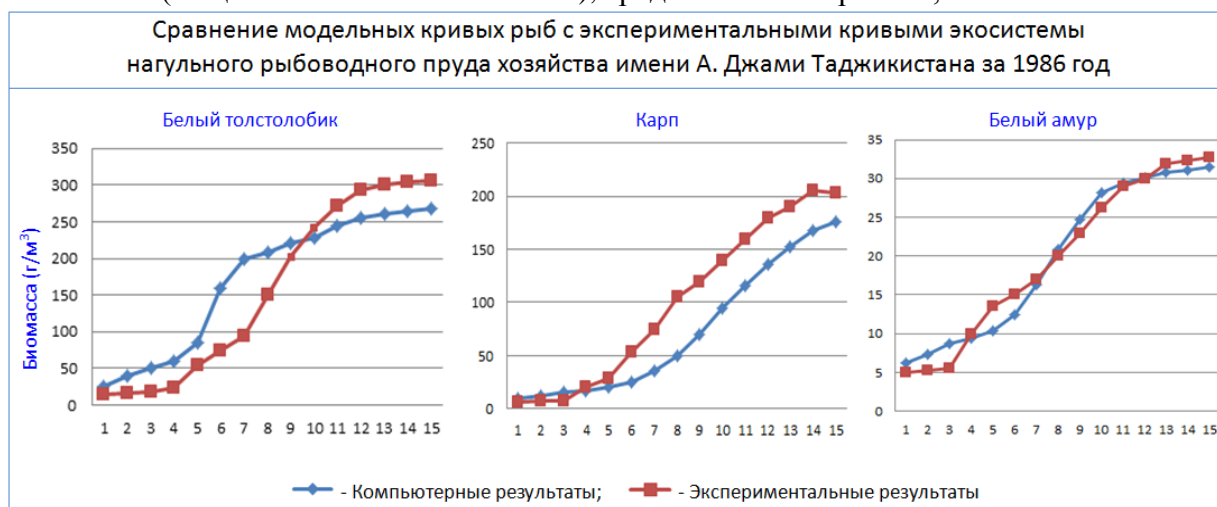


Рис. 7

Начальная концентрация белого амура составляет $5,6 \text{ г/м}^3$, что соответствует посадке 625 шт/га (общее количество – 5000 шт), со средним весом 90 г . Рост карпа начинается в самом начале сезона, тогда как белый амур начинает расти в июне, а белый толстолобик лишь в июле, так как их рост в значительной степени лимитируется температурой воды. Средний вес рыб в конце сезона – 648 г для карпа, 785 г для толстолобика и 617 г для белого амура, соответствующие концентрации равны 204 , 300 и $32,4 \text{ г/м}^3$ (живой вес – рис. 8 и рис. 9).

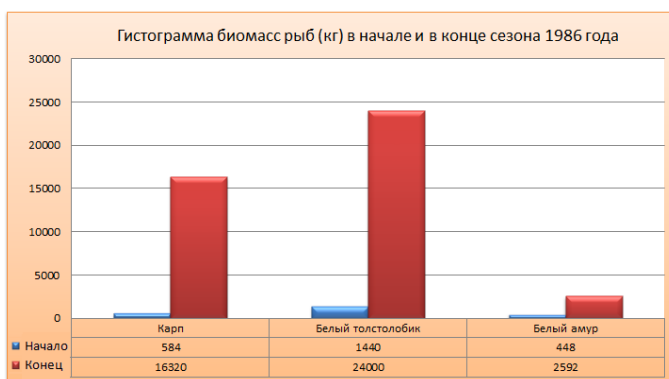


Рис. 8



Рис. 9

Для повышения прогностических свойств математической модели разработаны процедуры итерационной верификации значений её коэффициентов и параметров на основе обновляемых значений климатических факторов и антропогенных нагрузок (кормовых и биогенных) для рыбоводных прудов. Процедуры апробировались в условиях рыбного хозяйства им. А. Джами общей площадью в 20 га .

По данным за 2014 г. начальная концентрация белого амура составляла $2,0 \text{ г/м}^3$, общее количество – $10\,000 \text{ шт}$, усреднённый вес – 40 г . Аналогичные показатели для карпа – $2,5$

г/м³, 20 000 шт и 25 г, а для белого толстолобика – 3,0 г/м³, 20 000 шт и 30 г. Как видно, начальные показатели рыбных популяций оказались намного ниже аналогичных им данных за экспериментальные 1986-1987 годы. Именно этим объясняются и итоговые результаты на конец сезона: суммарный вес белого амура оказался равным 12 750 кг, его концентрация – 63,75 г/м³, у карпа – 10 200 кг и 51 г/м³, а у белого толстолобика – 15 300 кг и 76,5 г/м³. В целом, в 2014 году всего было собрано 38 250 кг рыб, что соответствовало рыбопродуктивности в 19,125 ц/га (персональное сообщение) экосистем рыбоводных прудов им. А. Джами общей площади 20 га. Модельная динамика концентраций рыб и её сравнение с опытными концентрациями за 2014 г. приведена на рис. 10.

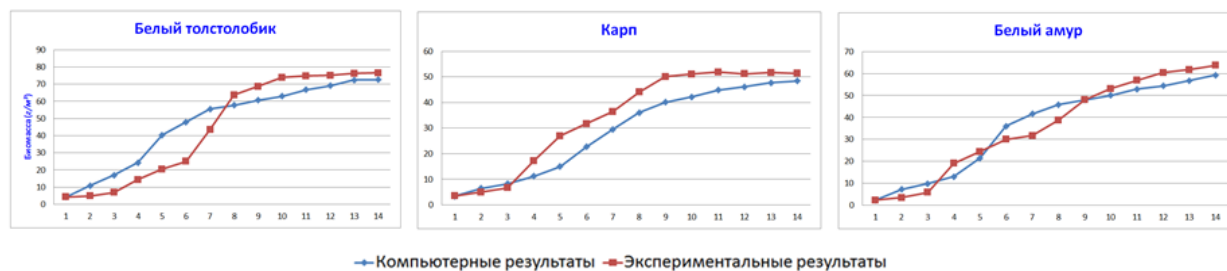


Рис. 10

Далее, на компьютере были разыграны 23 климатических и управленческих сценарных вариантов прогнозирования динамики развития переменных модельной экосистемы для выявления закономерностей эволюции макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром на конечный момент времени годового сезона, т.е. на 30-го сентября.

Первые 4 сценарии отражают динамику переменных экосистемы в условиях более холодного и более теплого сезонов, а также сезонов при большей и при меньшей освещённости. В первом случае концентрация рыб к концу сезона, относительно исходного варианта, стала намного меньше, что говорит о малой приемлемости такой погоды для их развития. Во втором случае, наоборот, рыбы и другие организмы немного увеличили свои концентрации. Видно, что все организмы, включая рыб, очень хорошо переносят теплую, близкую к оптимальной температуре, погоду. В третьем и четвёртом случаях, продуценты от тенденции быстрого снижения веса перешли к медленной. Основная причина, по-видимому, в том, что при таких вариантах развития экосистемы почти весь массив солнечных радиаций, используемый в модели, благоприятно влияет на рост и развитие водорослей и высших водных растений пруда. Видимо в условиях континентального климата солнечная радиация никогда не лимитирует рост фитопланктона и макрофитов, что в конечном итоге это будет сказываться и на концентрации рыбной популяции.

Четыре последующие сценарии (5-8) посвящены увеличением и уменьшением (на 25% от исходного) внесения кормовых растений в пруд для белого амура, а также увеличением и уменьшением (также на 25%) дозировки искусственного корма для карпа. В первом случае, кроме тростника, концентрация которого немного убавилась, поведение остальных переменных модели остались такими же, как в исходном варианте. Белый амур немного увеличил свою концентрацию, карп почти не изменил, а белый толстолобик немного уменьшил. Во втором случае, наоборот, концентрация тростника в конце сезона немного прибавилась. Концентрация рыб в конце сезона по отношению с соответствующими концентрациями в исходном варианте были немного противоположны 5-ому сценарию. Результаты третьего и четвёртого случаев свидетельствуют о том, что для рыб, в целом, а для карпа, в частности, такие ходы развития экосистемы не выгоден. По-видимому, исходный вариант кормления карпа является наиболее оптимальным.

Сценарии 9-12 отражают динамику экосистемы в условиях иных режимов удобрений. Полученные результаты показывают, что это на поведение экосистемы мало отразилось.

Далее разыграны два сценария (13-14) при одновременном уменьшении и увеличении на 25% дозы и азотных, и фосфорных удобрений. В первом случае, развитие экосистемы

происходит в точности по исходному варианту. Во втором случае, фосфор является лимитирующим фактором для роста микроорганизмов и высших водных растений в течение всего сезона, а азот – во второй его половине. Такой ход развития процесса наиболее сильно влиял на динамику экосистемы в целом. С одной стороны, хуже развивалась естественная кормовая база – ниже уровень концентрации фитопланктона, ниже максимумы зоопланктона, бактерии и бентоса. С другой стороны, заметно прибавились концентрации тростника, фосфора, азота и детрита седиментов. Конечные концентрации рыб к концу сезона достигли значений – $30,34\text{г}/\text{м}^3$, $96,13\text{г}/\text{м}^3$ и $219,1\text{г}/\text{м}^3$ для белого амура, карпа и белого толстолобика, соответственно (рис. 11).

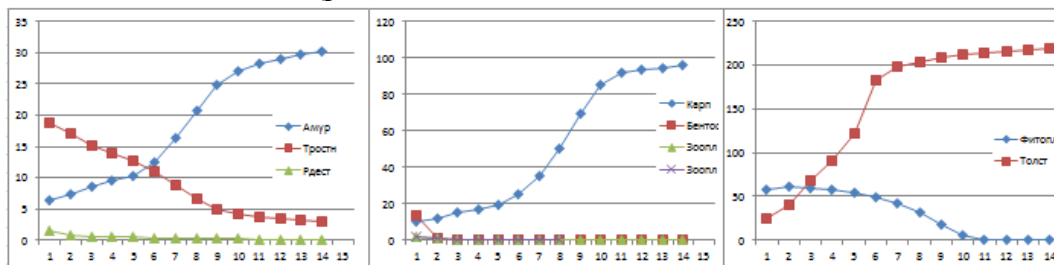


Рис. 11

Сценарий 15 (рис. 12) демонстрирует развитие экосистемы с одним видом рыб – белым амуром. В силу отсутствия белого толстолобика в пруду концентрации фитопланктона и зоопланктона в течение всего сезона стабильно увеличивались, а тростника и рдеста медленно убавились. Бактерия и бентос устойчиво удерживали свои концентрации. Концентрация белого амура в конце сезона составила $20,54\text{г}/\text{м}^3$, что соответствует сбору урожая в 1643кг . Это намного ниже исходного варианта. Отсюда можно заключить, что рост рыб в пруду в значительной степени являются независимыми. Более того, их совместная деятельность может положительно повлиять на их общее развитие.

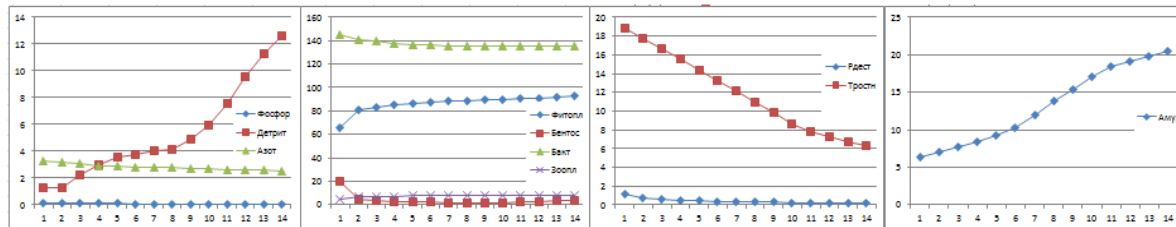


Рис. 12

Сценарий 16 посвящен развитию экосистемы с двумя видами растительноядных рыб – белым амуром и белым толстолобиком. Концентрация белого амура в конце сезона равнялась $23,69\text{г}/\text{м}^3$, а белого толстолобика – $208,6\text{г}/\text{м}^3$, что ниже, чем в исходном варианте. Видимо и такой вариант развития экосистемы не выгоден для роста и развития рыб.

Сценарий 17 по аналогии со сценарием 15 демонстрирует развитие экосистемы с одним видом рыб – белым толстолобиком. Ввиду отсутствия белого амура тростник серьезно прибавил в весе. Концентрация толстолобика в конце периода по отношению с исходным вариантом была немного выше – $222,6\text{г}/\text{м}^3$, что соответствует сбору урожая в 24045кг . Это объясняется высоким содержанием концентрации фитопланктона в течение всего сезона. Поведение остальных переменных модели и их концентраций были близки к соответствующим концентрациям предыдущего, 16-го сценария.

Сценарий 18 по аналогии со сценарием 16 посвящен развитию экосистемы с двумя видами рыб – карпом и белым толстолобиком. Концентрация карпа к концу сезона достигла метки $69,72\text{г}/\text{м}^3$, а толстолобика – $211,3\text{г}/\text{м}^3$.

Сценарии 19-21 предполагают развитие экосистемы в условиях уменьшенной (в 2 раза) посадкой рыб, соответственно $CR:=CR/2$, $TL:=TL/2$, $BA:=BA/2$. Факты указывают (рис. 13) на то, что два первых случая развития экосистемы совсем не выгодны для выращивания рыб. Третий случай может подходить для выращивания карпа и белого

толстолобика, а белый амур в этом случае, будет чувствовать себя угнетенным. По всей видимости, исходный вариант посадки рыб является более оптимальным.

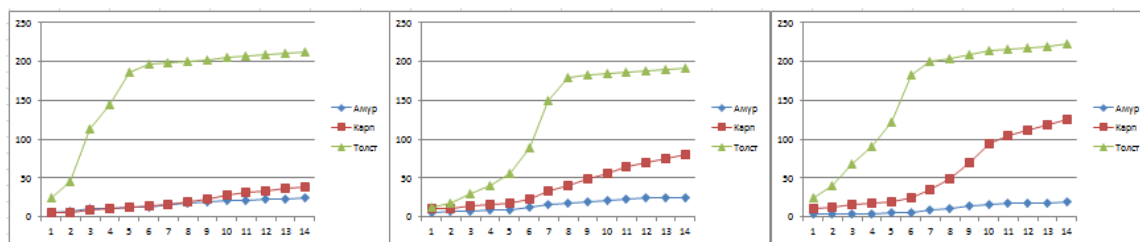


Рис. 13

Прогнозированию развития экосистемы в условиях удвоенной посадки белого амура ($BA := BA * 2$, 1250шт/га) посвящено сценария 22. В этом случае (рис. 14а), конечная концентрация белого амура $39,87 \text{ г/м}^3$ (3190кг), карпа – $76,41 \text{ г/м}^3$ (8863кг), а белого толстолобика – $210,5 \text{ г/м}^3$ (22731кг). Хотя концентрация белого амура в данном случае становится больше, тем не менее, средний вес карпа и белого толстолобика к концу сезона, относительно исходного варианта, понизился.

Последний 23-й сценарий предполагал развитие экосистемы рыбоводного пруда в условиях полуторной посадки белого амура ($BA := BA * 1.5$, 938шт/га). К очень большому удивлению, неожиданно конечные концентрации рыб к концу сезона достигли невероятных значений – $41,59 \text{ г/м}^3$ (3327кг), $126,4 \text{ г/м}^3$ (14662кг) и $220,1 \text{ г/м}^3$ (23765кг) для белого амура, карпа и белого толстолобика, соответственно (рис. 14б).

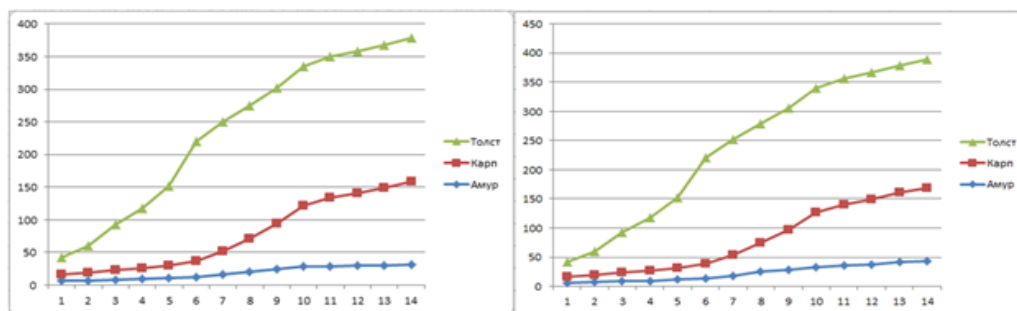


Рис. 14 а,б

Карп с точностью до килограмма повторял результат исходного варианта развития экосистемы рыбоводного пруда, белый толстолобик очень близко подошел и к исходному варианту, и к своим экспериментальным выловам, а белый амур не только превысил результата исходного варианта, но и перешагнул свой экспериментальный вылов за 1986 года на целых 735кг, (рис.15). Отсюда можно заключить, что при посадке рыб в экосистеме количество годовиков белого амура, по-видимому, надо увеличивать в полтора раза.

Таким образом, полученная в результате имитационных экспериментов динамика переменных вполне адекватно отражает реальную картину развития макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром в течение одного сезона.

В заключение работы и в выводах сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ВЫВОДЫ

1. Для исследования и прогнозирования динамики экосистем рыбоводных прудов южного региона Таджикистана впервые построена концептуальная модель, основанная на

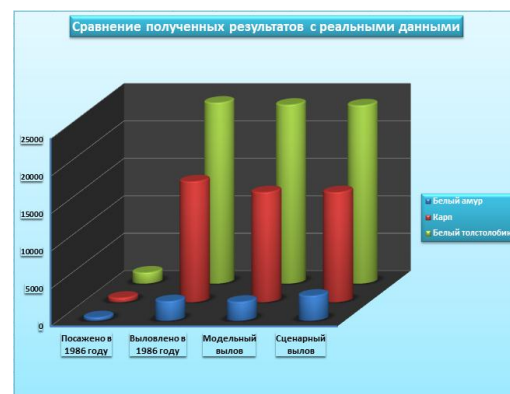


Рис. 15

описании биогидрохимических круговоротов вещества и изменении биотических и химических элементов, которая кроме двух известных видов рыб – белого толстолобика и карпа, также учитывает *макрофитную рыбу – белого амура*.

2. На основе концептуальной модели макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром построена *модифицированная точечная компьютерно-математическая (имитационная) модель*, которая учитывает влияние температуры воды, солнечной радиации, биогенной нагрузки и управляющих факторов таких, как добавления в систему комплекса органических и биогенных веществ, а также внесения в пруд корма заводского приготовления и кормовых растений. Математическая модель представляет собой систему 15 нелинейных ОДУ первого порядка со специально подобранными коэффициентами, описывающими характер взаимодействия гидробионтов.
3. В модельной форме впервые *проанализировано* и получило своего *дальнейшего развития исследование процесса зарастания прудов* высшей водной растительностью (макрофитами) – излюбленным кормом белого амура. С помощью математической модели впервые *выявлена роль микробиологических процессов* в высокопродуктивной экосистеме рыбоводного пруда и разработаны более *совершенные способы учёта* фитопланктона и бактерий в её соответствующей компьютерной модели.
4. Рассмотрены особенности *учёта* в математической модели биогенных и органических веществ, газового режима и *эффекты распределения* веществ между водной толщью и седиментами экосистемы рыбоводного пруда.
5. Построены соответствующие *алгоритмы* поставленных задач и даны их реализация в виде *объектно-ориентированного и проблемно-ориентированного комплексов программ*.
6. Создан *инструмент исследования* (имитатор) – *программный комплекс* для изучения, экспериментирования, применения, управления и прогнозирования динамики макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром при различных вариантах экзогенных параметров с целью достижения высокой рыбопродуктивности пруда.
7. Разработана *обобщенная методика* компьютерно-математического (имитационного) моделирования макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром общего типа.
8. Предложена *модифицированная методика настройки и использования инструмента* управления и прогнозирования макрофитной экосистемы рыбоводного пруда в виде соответствующих методов идентификации и верификации модели. Продуманы формы проведения *компьютерных экспериментов*, разыграны всевозможные *сценарные варианты* динамики развития экосистемы. Полученные компьютерные результаты проанализированы, систематизированы, обобщены и интерпретированы. Эти компьютерные варианты развития экосистемы свидетельствуют о том, что ее можно использовать для оперативного прогнозирования и учёта последствий различных режимов управления.
9. Разработанная имитационная модель *адекватно воспроизводит процессы*, происходящие в экосистемах рыбоводных прудов южного региона Таджикистана.
10. Полученные результаты работы можно использовать для количественных и качественных исследований рыбоводных прудов стран Средней Азии и Казахстана.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Монографии

1. **Косимов, И.Л.** Имитационная модель динамики экосистемы макрофитного рыбоводного пруда [Текст]: монография / Ф.С. Комилов, И.Л. Косимов. – Germania: LAP LAMBERT Academic Publishing (Project ID: #130070; ISBN 978-3-659-80543-1) / <https://www.lap-publishing.com/> – LAP: OmniScriptum GmbH & Co. KG, Bahnhofstraße 28, D-66111 Saarbrücken, 2015. – 135 с.

Статьи, опубликованные в журналах и сборниках

2. **Косимов, И.Л.** Программирование математической модели экосистемы рыбоводного пруда и проведение над ней компьютерных экспериментов [Текст] / Ф.С. Комилов, И.Л. Косимов // Вестн. Тадж. нац. ун-та. – Душанбе, 2014. – № 1/3 (85). – С.17-27.
3. **Косимов, И.Л.** Имитационное моделирование рыбной популяции экосистемы пруда [Текст] / Ф.С. Комилов, И.Л. Косимов // Изв. АН Респ.Таджикистан. Отд-ние физ. мат., хим., геол. и техн. наук. – 2013. – №2 (151). – С. 52-64.
4. **Косимов, И.Л.** Математическое моделирование экосистемы макрофитно-рыбоводного пруда с белым амуром [Текст] / И.Л. Косимов, Ф.С. Комилов // Вестн. пед. ун-та (Изд. ТГПУ им. С. Айни. Сер. естеств.- мат. наук и методика их обучения). – Душанбе, 2013. – № 5 (54). – С. 109-115.
5. **Косимов, И.Л.** Жизненный цикл макрофитов: описание протекающих процессов, математическое моделирование [Текст] / Ф.С. Комилов, И.Л. Косимов // Вестн. Тадж. нац. ун-та. – Душанбе, 2012. – № 1/3 (85). – С.42-47.
6. **Косимов, И.Л.** Концептуальное моделирование экосистемы макрофитно-рыбоводного пруда / Ф.С. Комилов, И.Л. Косимов [Текст] // Вестн. Тадж. нац. ун-та. – Душанбе, 2012. – № 1/3 (85). – С. 58-66.
7. **Косимов, И.Л.** Белый амур: проведение компьютерных экспериментов с моделью экосистемы рыбоводного пруда [Текст] / Ф.С. Комилов, И.Л. Косимов // Наука и инновация. Сер. естеств. и экон. наук. – Душанбе, 2014. – № 1. – С. 8-13.
8. **Косимов, И.Л.** Имитационная модель экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром [Текст] / И.Л. Косимов, Ф.С. Комилов // Тадж. нац. ун-т: материалы респ. конф., посвящ. 70-летию проф. Б. Алиева. Современные проблемы прикладной математики и информатики. – Душанбе, 2014. – С. 63-65.
9. **Косимов, И.Л.** О разработке математической модели динамики экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром [Текст] / И.Л. Косимов // Респ. науч.-практ. конф.: «ИТ – технологии. Современное состояние и перспективы развития». – Душанбе, 2014. – С. 79-84.
10. **Косимов, И.Л.** Математическое моделирование эколого-экономической системы пруда / Ф.С. Комилов, И.Л. Косимов [Текст] // Вестн. Тадж. гос. ун-та коммерции. – Душанбе, 2013. – № 1. – С. 57-64.
11. **Косимов, И.Л.** Белый амур: математическое моделирование [Текст] / Ф.С. Комилов, И.Л. Косимов // Современные проблемы математического анализа, алгебры и теории чисел: материалы междунар. науч. конф. посвящ. 85-летию со дня рожд. проф. Г.Б. Бабаева. – Душанбе, 2013. – С. 35-36.
12. **Косимов, И.Л.** Об автоматизации обмена данных между MS Excel-2010 и Borland Delphi-9 для задачи программирования экосистем рыбоводных прудов [Текст] / Ф.С. Комилов, И.Л. Косимов // Компьютерный анализ проблем науки и технологии: материалы IX междунар. конф., посвящ. 65-летию со дня образования. – Душанбе, 2013. – С. 48-51.
13. **Косимов, И.Л.** О разработке математической модели экосистемы рыбоводного пруда [Текст] / Ф.С. Комилов, И.Л. Косимов // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – Бишкек, 2015.-№5, с. 18-22.
14. **Косимов, И.Л.** Инструмент исследования по экспериментированию и прогнозированию динамики экосистемы рыбоводного пруда [Текст] / Ф.С. Комилов, И.Л. Косимов // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – Бишкек, 2015.-№5, с. 27-29.
15. **Косимов, И.Л.** Концептуальная модель экосистемы пруда с тремя видами рыб [Текст] / Ф.С. Комилов, И.Л. Косимов // Известия вузов Кыргызстана. – Бишкек, 2015.-№7, с. 6-9.

Косимов Исмоил Латиповичтин «Ак амур бар балык өстүрүүчү көлчөнүн макрофиттик экосистемасынын математикалык моделин иштеп чыгуу жана изилдөө» темасындагы 05.13.18 – «Математикалык моделдештирүү, сандык ыкмалар жана программалар комплекси адистиги» боюнча техникалык илимдердин кандидаты илимий даражасын алууга карата

РЕЗЮМЕ

Негизги сөздөр: математикалык модель, алгоритм, программа, объективдүү-багытталган программалоо тили, электрондук таблица, компьютер, компьютердик моделдештирүү, имитациялоо, экосистема, балык багылуучу көлмө, балык, ак амур, карп, жазы маңдай ак балык, макрофит, фитопланктон, зоопланктон, бентос, фосфор, азот, көмүртек, детрит, стехиометрия, лизис, камдап алуу, жок болуу, метаболизм, идентификациялоо, верификациялоо, эксперимент, сценарий, динамика.

Изилдөөнүн объектиси: ак амур балыгы бар балык багылуучу көлмөнүн макрофиттик экосистемасы.

Изилдөөнүн максаты: ак амур балыгы бар балык багылуучу көлмөнүн макрофиттик экосистемасынын иштеп туруу мыйзам ченемдүүлүктөрүн аныктоо.

Изилдөөнүн методдору: имитациялоочу моделдештирүү, системалуу талдоо, дифференциалдык теңдештиктер, Рунге-Кутта-Мерсондун сандык методу, объективдүү багытталган Borland Delphi-9 программалоо тили, изилдөөнүн идентификациялык жана верификациялык методдору (MS Excel 2010), сценарий методу, компьютердик эксперимент.

Аппаратура: IBM PC тибиндеги персоналдык компьютерлер, ар түрдүү серверлер.

Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңычылыгы: Тажикстандын түштүк аймагынын эркин жүрүүчү балыктар багылуучу көлмөлөрүнүн динамикасын изилдөө жана божомолдоо үчүн алгачкы жолу компьютердик-математикалык (имитациялык) модель курулду, ал балыктардын эки белгилүү түрүнөн – жазы маңдай ак балык жана карптан башка, макрофитно жей турган (өсүмдүктөрдү) балыкты – ак амурду дагы эске алат; алгачкы жолу моделдик формада көлмөлөрдүн көп суу өсүмдүктөрүнүн – ак амурдун сүйүктүү тамагынын өсүп кетүү процесси талдоого алынган; алгачкы жолу математикалык моделди пайдалануу менен балык багылуучу көлмөлөрдүн жогорку продуктивдүү экосистемаларындагы микробиологиялык процесстердин ролу жана фитопланктондорду жана бактерияларды эсепке алуунун көбүрөк өркүндөтүлгөн ыкмалары изилденген; биогендүү жана органикалык заттар моделиндеги эсепке алуунун өзгөчөлүктөрү, газ режиминдеги жана суу калыңдыгы менен көлмөлөрдүн седименттеринин ортосундагы заттардын алмашуусу караштырылган; проблемалуу-багытталган программалык комплекс түрүндө ак амуру бар балык багылуучу көлмөнүн макрофиттүү экосистемасын жогорку балык өндүрүмдүүлүккө жетишүү максаты менен башкаруу жана божомолдоо үчүн инструмент (имитатор) алынган; балык багылуучу көлмөнүн макрофиттүү экосистемасын башкаруу жана божомолдоо шайманын калыпка салуунун жана пайдалануунун модификацияланган методикасы идентификациялоонун жана математикалык моделди верификациялоонун тиешелүү сандык методдору түрүндө сунушталган; иштелип чыгарылган имитациялоочу модель балык багылуучу көлмөлөрдүн экосистемасында болуп жаткан процесстерди адекваттуу көрсөтүп турат.

Колдонуу деңгээли: изилдөөлөрдүн жыйынтыктары ТР ИА Зоология жана паразитология институтунун балык өстүрүү боюнча ведомстволор аралык бөлүмү тарабынан колдонууга киргизилген, атайын курстарды окууда ТУУда жана ПСИде колдонулат.

Колдонуу тармагы: конструкциялоо, моделдештирүү, башкаруучулук чечимдерди кабыл алуу, илимий изилдөө, эсептөөчү, эксперттик жана окутуу тапшырмалары.

РЕЗЮМЕ

диссертации Косимова Исмоила Латиповича на тему: «Разработка и исследование математической модели динамики макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Ключевые слова: математическая модель, алгоритм, программа, объектно-ориентированный язык программирования, электронная таблица, компьютер, компьютерное моделирование, имитация, экосистема, рыбоводный пруд, рыба, белый амур, карп, белый толстолобик, макрофит, фитопланктон, зоопланктон, бентос, фосфор, азот, углерод, детрит, стехиометрия, лизис, запасание, отмирание, метаболизм, идентификация, верификация, эксперимент, сценарий, динамика.

Объект исследования: макрофитная экосистема рыбоводного пруда с белым амуром.

Цель работы: выявление закономерностей функционирования макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром.

Методы исследования: имитационное моделирование, системный анализ, теория дифференциальных уравнений, численный метод Рунге-Кутты-Мерсона, объектно-ориентированный язык программирования Borland Delphi-9, идентификационные и верификационные методы исследования, информационные технологии (MS Excel 2010), метод сценарий, компьютерный эксперимент.

Аппаратура: персональные компьютеры типа IBM PC, различные сервера.

Полученные результаты и их новизна: впервые для исследования и прогнозирования динамики нагульных рыбоводных прудов южного региона Таджикистана построена компьютерно-математическая (имитационная) модель, которая кроме двух известных видов рыб – белого толстолобика и карпа, также учитывает макрофитную (растительную) рыбу – белого амура; впервые в модельной форме проанализирован процесс зарастания прудов высшей водной растительностью – излюбленным кормом белого амура; впервые с использованием математической модели изучена роль микробиологических процессов в высокопродуктивных экосистемах рыбоводных прудов и более совершенных способов учёта фитопланктона и бактерий; рассмотрены особенности учёта в модели биогенных и органических веществ, газового режима и эффекты распределения веществ между водной толщей и седиментами прудов; в виде проблемно-ориентированного программного комплекса получен инструмент исследования (имитатор) для управления и прогнозирования макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром с целью достижения высокой рыбопродуктивности; предложена модифицированная методика настройки и использования инструмента управления и прогнозирования макрофитной экосистемы рыбоводного пруда в виде соответствующих численных методов идентификации и верификации математической модели; разработанная имитационная модель адекватно воспроизводит процессы, происходящие в экосистемах рыбоводных прудов.

Степень использования: результаты исследований внедрены Межведомственным отделом по рыбопроизводству Института зоологии и паразитологии АН РТ, используются в ТНУ и ИПС при чтении специальных курсов.

Область применения: конструирование, моделирование, принятие управленческих решений, научное исследование, вычислительные, экспертные и учебные задачи.

SUMMARY

dissertation of Kosimov Ismoil Latipovich on the theme: «Development and research of mathematical model of dynamics of the macrophyte fishpond ecosystems with white amur» for the degree of candidate of technical sciences on specialty 05.13.18 – «Mathematical modeling, numerical methods and program complexes»

Key words: mathematical model, algorithm, program, object-oriented programming language, spreadsheet, computer, computer modeling, simulation, ecosystem, fishpond, fish, white amur, carp, white silver carp, macrophyte, phytoplankton, zooplankton, benthos, phosphorus, nitrogen, carbon, detritus, stoichiometry, lysis, stocking, dying off, metabolism, identification, verification, experiment, scenario, dynamics.

Object of researches: macrophyte fishpond ecosystems with white amur.

The work purpose: to identify patterns of functioning of macrophyte ecosystem fishpond with white amur.

Research methods: simulation, system analysis, theory of differential equations, numerical method of Runge-Kutta-Merson, object-oriented Borland Delphi-9 programming language, identification and verification methods of research, information technology (MS Excel 2010), the method of the scenario, computer experiment.

Equipment: personal computers type IBM, different servers.

The developed results and their novelty: first for research and prognostication of dynamics of stocker fish-breeder ponds of south region of Tajikistan a computer-mathematical (imitation) model that except two known types of fishes – white silver carp and carp, also takes into account macrophyte poisonous (vegetable poisonous) fish – white amur; first the process of overgrowing of ponds a higher water vegetation is analyzed in a model form - by the favourite feed of white amur; first with the use of mathematical model the role of microbiological processes is studied in the highly productive ecosystems of fish-breeder ponds and more perfect methods of account of phytoplankton and bacteria; the features of account are considered in the model of biogenic and organic substances, gas mode and effects of distribution of substances between water thickness and sediment ponds; as the problem-oriented software complex a research tool (imitator) is got for a management and prognostication of macrophyte ecosystem of fish-breeder pond with white amur with the purpose of achievement of high fishing productivity; the modified methodology of tuning and use of instrument of management and prognostication of macrophyte ecosystems of fish-breeder pond is offered as corresponding numeral methods of identification and verification of mathematical model; developed a simulation model adequately reproduces the processes occurring in fishponds ecosystems.

Use degree: the results of researches are applicated by the Interdepartmental office on fishing production Institute of zoology and parasitology of the Academy of Sciences of Republic of Tajikistan, used in TNU and IIS at reading of the special courses.

Application domain: constructing, simulation, management decision-making, scientific research, calculable, expert and educational problems.

Косимов Исмоил Латипович



Разработка и исследование математической модели динамики макрофитной экосистемы рыбоводного пруда с белым амуром.
Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата тех. наук.

Подписано в печать 16.03.2016. Заказ № _____

Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография «Техник»