

УДК 556.55: 556.5072+597.2/.5

ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОПУЛЯЦИЙ РЫБ И ОЗЕРНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. В. Меншуткин

Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН

Предлагаются подходы к модельному описанию озерной системы с учетом гидрологических, гидробиологических и икhtiологических процессов, а также к изучению изолированной популяции окуня с учетом переменного темпа роста и изменения способов питания. Все характеристики представлены в виде лингвистических переменных. Для описания функциональных зависимостей использована элементарная логика. Такой подход позволяет использовать при построении модели словесное описание процессов без математической формализации.

Ключевые слова: логико-лингвистическое моделирование, озерные экосистемы, рыбы.

V. V. Menshutkin. LOGICAL-LINGUISTIC MODELS OF THE FISH POPULATIONS AND LAKE ECOLOGICAL SYSTEMS

We suggest approaches to model-based description of the lake system taking into account the hydrological, hydrobiological and ichthyological processes, as well as to the study of the isolated population of perch taking into account the variable growth rate and modification of feeding modes. All characteristics are presented as linguistic variables. Description of functional relationships is realized as the elementary logic function. This approach requires only verbal description without mathematical formalization.

Key words: mathematical models, lake ecosystems, fish.

Введение

Основу настоящей публикации составляют два положения. Первое – общепризнанное в лимнологии положение о целостности озера как сложной системы. Второе, гораздо менее распространенное, – это положение о том, что все количественные характеристики озера являются достаточно размытыми величинами. Последнее положение неявно учитывается при статистической обработке наблюдений с указанием доверительных интервалов. Однако когда речь идет о параметрах функциональных зависимостей, связывающих отдельные переменные, характеризующие озерную систему, то одних доверительных интервалов оказывается недостаточно. Дело в том, что такие осново-

полагающие параметры, как, например, коэффициенты турбулентной диффузии или коэффициенты смертности гидробионтов, требуют для своего определения достаточно сложных экспериментальных исследований. Использование «литературных» данных, полученных обычно совсем в иных условиях, чем в данном конкретном случае, вносит дополнительную и трудно определимую неопределенность. Высказанные соображения приводят к тому, что создание модели всей системы озера представляется затруднительным при использовании традиционных средств в виде систем дифференциальных или конечноразностных уравнений. Трудность усугубляется еще и тем, что применение потоков энергии как связующего звена всех элементов озерной системы при-

водит к необходимости оперирования величинами, отличающимися на несколько порядков. Так, энергетические потоки теплового баланса озера не сопоставимы с энергетическими потоками в биотической части озерной экосистемы, особенно если дело касается сообществ промысловых рыб.

В настоящей публикации предлагается выход из создавшегося положения при помощи применения логико-лингвистических моделей [Заде, 1976; Поспелов, 1981]. Поскольку применение моделей такого типа еще не получило в лимнологии и гидробиологии широкого распространения, то изложение ведется, начиная с простейших примеров, касающихся хорошо изученных объектов – популяций рыб.

Для читателей, незнакомых с теорией размытых множеств и логико-лингвистических моделей, поясняем, что речь идет об использовании обычных слов естественного языка (в данном случае русского) для описания переменных и их значений в компьютерных программах [Поспелов, 1981]. Такой подход почти неизбежно влечет за собой представление о том, что величины, описываемые терминами «много», «мало», «ничтожно мало», являются размытыми, для их описания приходится применять аппарат нечеткой логики [Заде, 1976].

Подавляющее большинство разработанных к настоящему времени моделей популяций рыб основано на применении математического аппарата дифференциальных или конечноразностных уравнений. Применение традиционных моделей довольно часто встречает возражения и сомнения в их правомочности [Тутубалин и др., 1999], связанные, главным образом, с нереалистичностью результатов моделирования, представляемого в виде точных чисел о количестве особей в популяции на много поколений вперед.

В первой части настоящей работы делается попытка исследования точности традиционной конечноразностной модели популяции рыб с помощью применения в ней математического аппарата размытых чисел. Неутешительные результаты проведенного анализа заставляют обратиться для построения моделей популяций рыб к технологиям искусственного интеллекта, в частности, к современной методике построения экспертных систем [Форсайт, 1987; Попов и др., 1996] и логико-лингвистических моделей [Заде, 1976; Поспелов, 1981]. Экспертные системы начинают применяться в экологических исследованиях [Salski, 1992] и, в частности, в ихтиологических исследованиях [Chen et al., 2000].

Последующие разделы работы посвящены логико-лингвистическим моделям популяций

рыб и всей озерной системы, включающей в себя как гидрологические, так и гидробиологические и ихтиологические процессы.

Модель популяции рыб с использованием размытых чисел

Все числовые величины, которые используются в традиционных моделях популяций рыб, являются величинами приближенными. Например, коэффициенты естественной смертности, определяемые обычно косвенными методами, содержат в себе существенный элемент неопределенности. То же можно сказать и о коэффициентах функций воспроизводства Риккера или Бивертон и Холта. Влияние неопределенности того или иного коэффициента на результат моделирования можно оценить при помощи анализа чувствительности, однако более целесообразно применить математический аппарат преобразования нечетких или размытых чисел [Поспелов, 1986].

Самым простым представлением нечеткого числа является указание диапазона его возможного изменения. Например, численность рыб возраста 3+ оценивается от 500 до 700 особей. Таким образом, каждая величина в модели популяции рыб описывается не одним числом, как обычно, а двумя – верхним (a) и нижним (b) пределом, а сама величина записывается как A (a, b).

Определим арифметические действия над нечеткими числами принятой формы (имеются в виду только положительные числа) [Kaufman, Gupta, 1985].

$$A(a, b) + B(c, d) = C(a+b, c+d) \quad (1)$$

$$A(a, b) - B(c, d) = C(a-b, c-d) \quad (2)$$

$$A(a, b) \cdot B(c, d) = C(\min(a \cdot b, a \cdot c, b \cdot c, b \cdot d), \max(a \cdot b, a \cdot c, b \cdot c, b \cdot d)) \quad (3)$$

$$A(a, b) / B(c, d) = C(\min(a/b, a/c, b/c, b/d), \max(a/b, a/c, b/c, b/d)) \quad (4)$$

Для иллюстрации применения аппарата нечетких чисел используем очень простую модель популяции рыбы, которая описана в руководстве по практическим занятиям для студентов по ихтиологии [Жаков, Меншуткин, 1982]. Блок-схема этой модели, выполненной на системе моделирования STELLA [Hannon, Ruth, 1997], приведена на рис. 1.

Моделируемая популяция состоит из трех возрастных групп и описывается следующей системой уравнений в конечных разностях (временной шаг модели – один год):

$$E = k \cdot N3_t \cdot (1 - M) \quad (5)$$

$$N3_{t+1} = N2_t \cdot (1 - M) \quad (6)$$

$$N2_{t+1} = N1_t \cdot (1 - M) \quad (7)$$

$$N1_{t+1} = \alpha \cdot E \cdot \exp(-\beta \cdot E), \quad (8)$$

где N_{1t} , N_{2t} и N_{3t} – численности рыб в возрасте 1+, 2+ и 3+, M – коэффициент естественной смертности, k – приведенная плодовитость, E – пополнение, M – коэффициент естественной смертности. При точных значениях параметров (например, $M = 0,3$, $k = 100$, $\alpha = 0,1$, $\beta = 0,0001$) модель приходит к устойчивому стационарному состоянию, а при уменьшении естественной смертности начинает испытывать незатухающие колебания.

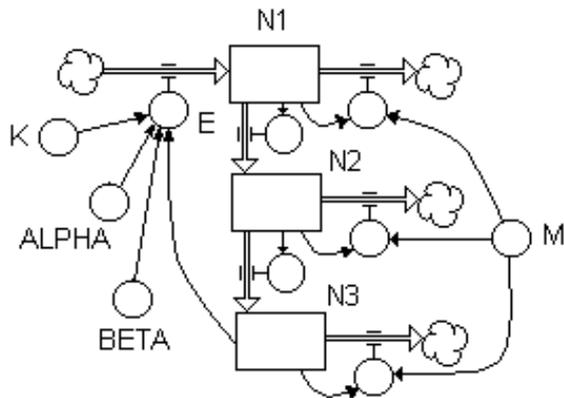


Рис. 1. Блок-схема простейшей модели популяции рыб. Обозначения системы моделирования STELLA

Внесение в рассматриваемую модель популяции рыбы даже очень небольших неопределенностей ($M(0,25, 0,35)$, $k(90, 110)$) приводит к тому, что по прошествии 3–4 лет численность и возрастная структура популяции становится полностью размытой (рис. 2).

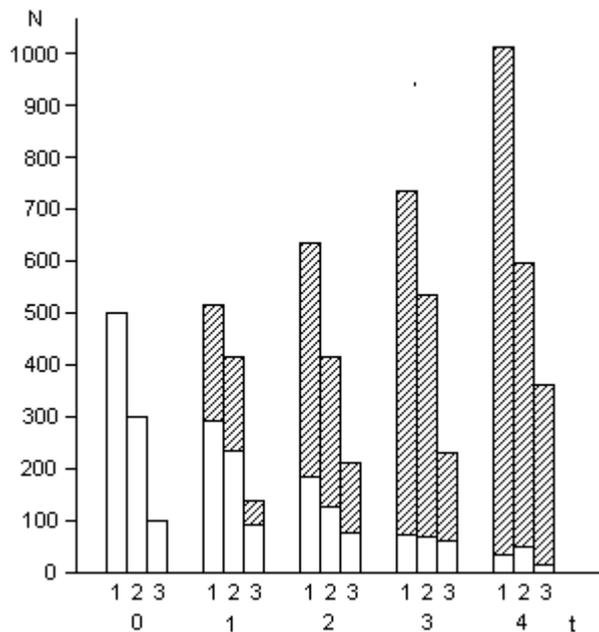


Рис. 2. Динамика возрастной структуры популяции при применении модели с нечеткой арифметикой: N – численность рыб; t – время в годах; 1 – N_1 ; 2 – N_2 ; 3 – N_3 . Заштрихована область неопределенности значений численности

Этот пример наглядно показывает, сколь иллюзорными могут оказаться результаты моделирования при помощи «точных» математических моделей. Опытные ихтиологи-практики это хорошо знают и, как правило, не рискуют давать более или менее конкретные прогнозы более чем на один-два года вперед. Выход из создавшегося положения может быть найден путем обращения к аппарату логико-лингвистического моделирования.

Модель популяции рыбы с использованием лингвистических переменных

Понятие лингвистической переменной было введено в науку Люфти Заде [1976], по образному выражению которого применение лингвистических переменных и нечеткой логики есть не что иное, как вычисления при помощи слов [Zade, 1999]. Представим модель популяции рыбы, рассмотренную в начале этой статьи, в виде совокупности операций с лингвистическими переменными. На рис. 3 изображены функции принадлежности (membership function) таких понятий, как «численность рыб очень мала» (1), «численность рыб мала» (2), «численность рыб на среднем уровне» (3), «численность рыб велика» (4), «численность рыб очень велика» (5). Аналогичным образом описываются величины естественной смертности и приведенной плодовитости.

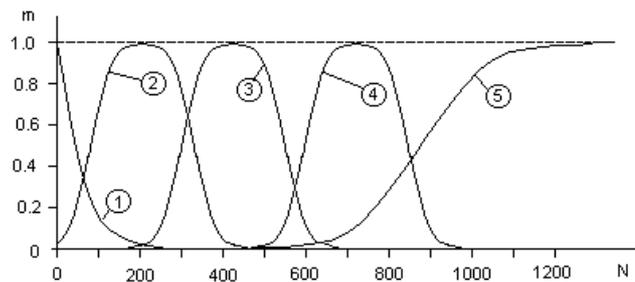


Рис. 3. Функции принадлежности (m) оценок численности рыб (N): 1 – очень низкая, 2 – низкая, 3 – средняя, 4 – высокая, 5 – очень высокая

При интерпретации формул (5)–(8) используется представление каждой функции принадлежности по 10 уровням нечеткости от 0 до 1. Для каждого уровня используются формулы, аналогичные формулам (1)–(4) для размытых чисел, заданных интервалами. В результате таких преобразований получают унимодальные функции принадлежности, однако в силу нелинейности формулы (8) они перестают быть симметричными. После получения функций принадлежности численности рыб всех возрастных

групп на следующий год, следует перейти от описания переменных в виде функций принадлежности к их словесному описанию по принятой шкале (defuzzyfication). Для этого производится сравнение полученных функций принадлежности с функциями принадлежности, которые соответствуют словесным определениям численности рыб («очень мало», «мало», «средне», «много», «очень много»). Лингвистическая переменная принимает то значение, функция принадлежности которого наиболее близка к полученной в результате преобразований по соотношениям (5)–(8). При таком подходе модель популяции рыб состоит из двух частей – базы знаний и системы логического вывода. В данном случае база знаний – это совокупность высказываний типа: «Если в данный год численность рыб возраста 0+ велика, то на следующий год численность рыб возраста 1+ при среднем значении естественной смертности окажется на среднем уровне», «Если суммарная численность выметанной икры в данном году очень велика, то на следующий год численность рыб в возрасте 0+ будет очень мала» и т. д.

Система логического вывода в данном случае осуществляет поиск в базе знаний необходимого высказывания и его приложение к конкретной ситуации. Некоторые результаты функционирования подобной модели представлены на рис. 4.

Данные исследования логико-лингвистической модели показывают, что с ее помощью можно воспроизвести все эффекты динамики численности популяции, которые могут быть получены с использованием модели, основан-

ной на решении системы дифференциальных уравнений в среде STELLA.

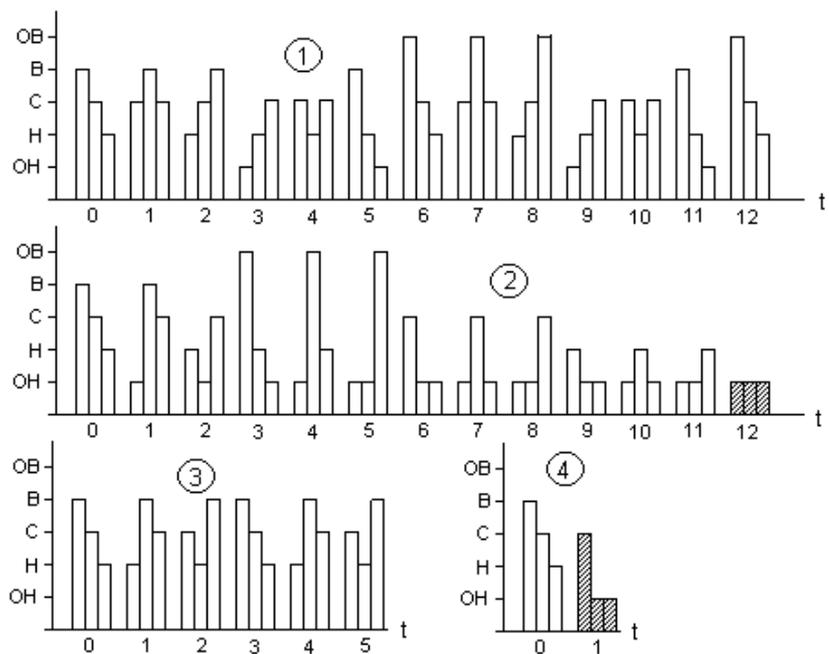
Логико-лингвистическая модель популяции окуня

Рассмотренная модель абстрактной популяции рыб, состоящая из трех возрастных групп, может служить только для иллюстративных целей и не может отразить особенности предлагаемого метода логико-лингвистического моделирования применительно к более конкретным и реалистичным объектам. Поэтому обратимся к примеру изолированной популяции окуня в озере Херя-ярви (Карельский перешеек), которая уже неоднократно использовалась для методических целей [Меншуткин, 1971].

Блок-схема модели изображена на рис. 5. В отличие от предыдущих разработок в этой модели не только численности рыб в возрастных группах (N_1 – N_6), но и темп роста окуня (W_2 – W_6), а также способ питания особей (зоопланктон, бентосом или собственной молодью) полагаются переменными величинами. Согласно рекомендациям специалистов по искусственному интеллекту [Поспелов, 1986], число градаций для описания количественных величин увеличено до семи («очень велико», «велико», «выше среднего», «средне», «ниже среднего», «низко» и «очень низко»), что более отвечает особенностям человеческого восприятия и мышления. Качественные величины, например способ питания, имеют привычные ихтиологические наименования («планктофаг», «бентофаг», «хищник»).

Рис. 4. Динамика возрастных структур модельной популяции. По оси абсцисс – время в годах, по оси ординат – численность рыб (ОВ – очень высокая, В – высокая, С – средняя, Н – низкая, ОН – очень низкая):

1 – естественная смертность очень низкая, приведенная плодовитость очень высокая (незатухающие колебания с периодом в 6 лет); 2 – естественная смертность очень низкая, приведенная плодовитость очень низкая (стационарное состояние); 3 – естественная смертность очень низкая, приведенная плодовитость низкая (незатухающие колебания с периодом в 4 года); 4 – естественная смертность высокая, приведенная плодовитость очень низкая (стационарное состояние)



Приведем примеры высказываний из базы знаний модели, которые обозначены цифрами на рис. 5.

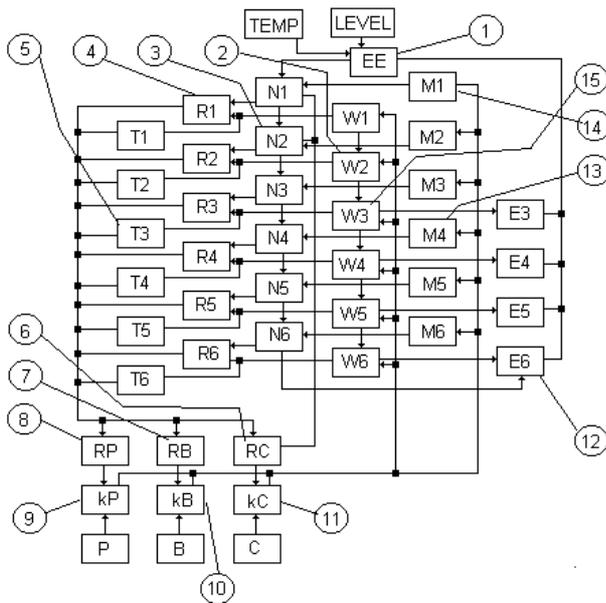


Рис. 5. Блок-схема логико-лингвистической модели популяции окуня:

N1–N6 – численность рыб в возрастных группах; W1–W6 – средняя масса тела особи в возрастных группах; R1–R6 – пищевые потребности; T1–T6 – способ питания (планктофаг, бентофаг или хищник); M1–M6 – смертность рыб в возрастных группах; E3–E6 – плодовитости самок; EE – суммарное количество выметанной икры; P – обилие зоопланктона; B – обилие бентоса; C – кормовая база хищников-каннибалов; kP – напряженность пищевых отношений при питании зоопланктоном; kB – напряженность пищевых отношений при питании бентосом; kC – напряженность отношений каннибализма; RP – суммарные пищевые потребности планктофагов; RB – суммарные пищевые потребности бентофагов; RC – суммарные пищевые потребности хищников-каннибалов. Цифрами обозначены примеры позиций базы знаний, приведенные в тексте

1 «Если суммарное количество выметанной икры (EE) было средним и количество зоопланктона (P) во время перехода личинок на внешнее питание было высоким и температура воды была средней (TEMP), то количество выживших мальков (N1) будет высоким»

2 «Если особи окуня в возрасте 1+ (N2) питаются зоопланктоном (T2) и биомасса зоопланктона в озере низка (P), то темп роста особей (W1) будет низок»

3 «Если численность особей окуня в возрасте 1+ (N2) была высокой и смертность в результате каннибализма особей старших возрастных групп была очень высокой (M2), то к концу года численность годовиков станет низкой»

4 «Если численность особей возраста 1+ (N2) была высокой и исходная масса тела особей (W2) также была высокой, и температура воды в озере (TEMP) была выше средней, то пищевые потребности этой возрастной группы (R2) оцениваются как очень высокие»

5 «Если масса тела особи в возрасте 2+ (W3) была низкой или очень низкой, то особи сохраняли питание зоопланктоном (T3), если масса тела была ниже средней, средней, выше средней или высокой, то особи питались бентосом, и только в случае очень высокой массы тела они переходили на хищное питание»

6 «Суммарные пищевые потребности хищников (RC) очень велики тогда и только тогда, когда на хищное питание перешло не менее трех старших возрастных групп окуня, причем их пищевые потребности оцениваются как высокие или очень высокие»

7 «Суммарные пищевые потребности бентофагов (RB) низки только в тех случаях, когда у всех возрастных групп окуня, питающихся бентосом, пищевые потребности (R1–R6) низки или у половины этих групп они очень низки, а у другой половины – низки или ниже среднего»

8 «Суммарные пищевые потребности планктофагов (RP) находятся на среднем уровне, если пищевые потребности всех возрастных групп в популяции окуня (R1–R6) оцениваются как средние или не больше чем для одной группы такая оценка принимает значение ниже среднего или выше среднего»

9 «Напряженность трофических отношений между популяцией окуня и зоопланктоном (kP) очень велика в том и только в том случае, когда суммарные пищевые потребности планктофагов очень велики, а биомасса зоопланктона очень мала»

10 «Напряженность трофических отношений между популяцией окуня и бентосом (kB) находится на среднем уровне, если суммарные пищевые потребности бентофагов (SB) и биомасса бентоса (B) находятся на среднем уровне или потребности бентофагов и биомасса бентоса оцениваются как ниже среднего, низкая или выше среднего или высокая одновременно»

11 «Напряженность трофических отношений между хищными окунями старших возрастных групп и молодь (kC) является высокой в том случае, когда пищевые потребности каннибалов велики или выше среднего, а ихтиомасса молоди ниже среднего или мала. Другая возможность подобной оценки возникает тогда, когда потребности каннибалов находятся на среднем уровне, но ихтиомасса молоди низка или очень низка»

12 «Плодовитость самок в возрасте 5+ (E6) высока, если масса их тела (W6) также высока»

13 «Естественная смертность окуней в возрасте 3+ (M4) выше средней, если особи этой группы являются планктофагами и напряженность пищевых отношений планктофагов средняя или выше средней, в случае если окуни этой

группы – бентофаги, то необходимо, чтобы напряженность пищевых отношений бентофагов оценивалась как средняя или выше средней, аналогичное требование и в случае хищного питания»

14 «Естественная смертность сеголетков окуня (M1) высока, если или напряженность отношений каннибализма (kC) велика, или напряженность при питании зоопланктоном (kP) высока. Возможен вариант при одновременной средней или выше средней напряженности каннибализма и питания зоопланктоном»

15 «Масса тела окуней в возрасте 2+ (W3) ниже средней в тех случаях, когда в прошлом году масса тела окуней в возрасте 1+ (W2) была средней и напряженность пищевых отношений выше средней или высокой или при средней исходной массе тела напряженность пищевых отношений была выше среднего или высокой. Другой вариант достижения массы тела ниже среднего связан с высокой исходной массой тела и очень высокой напряженностью пищевых отношений»

Всего в базе знаний модели популяции окуня дано 882 высказывания, подобных приведенным. Записаны эти высказывания в символической форме, а не на естественном языке, что сокращает объем памяти и упрощает работу с базой. Это, однако, никак не влияет на существо дела, поскольку между словесной и символической формой существует взаимно однозначное соответствие.

Функционирование модели заключается в последовательном поиске в базе знаний нужных правил, которые привели бы от оценки состояния популяции в данный год (N1–N6 и W1–W6) к оценкам для следующего года при учете внешних воздействий в виде температуры (TEMP), условий на нерестилищах (LEVEL), биомассы зоопланктона (P) и бентоса (B). Первоначально определяется трофический статус особей всех возрастных групп, кроме первой, особи которой во всех случаях питаются зоопланктоном. Далее следует поиск тех правил в базе знаний, при помощи которых можно определить пищевые потребности и напряженность трофических отношений. По известным оценкам напряженности трофических отношений производится поиск тех правил, которые относятся к естественной смертности (включая каннибализм) и темпам роста.

Процесс воспроизводства представлен в модели правилами, связывающими плодовитость самок с массой их тела. Соотношение полов полагается в модели постоянным. Выживание икринок и молоди оценивается по правилам, учитывающим не только суммарное ко-

личество выметанных икринок, но и условия на нерестилищах (возможность гибели кладок при падении уровня озера), ситуации с наличием достаточного количества корма для личинок и температуру воды. Годовой цикл завершается переносом данных о состоянии каждой возрастной группы (кроме последней) в раздел данных о следующей возрастной группе.

На рис. 6 представлен пример функционирования рассматриваемой модели популяции окуня. Возникновение периодических незатухающих колебаний возрастной структуры популяции под воздействием каннибализма является свидетельством того, что созданная логико-лингвистическая модель не входит в противоречие с исследованными ранее моделями того же природного объекта, но с использованием балансового подхода и аппарата уравнений в конечных разностях [Меншуткин, 1971].

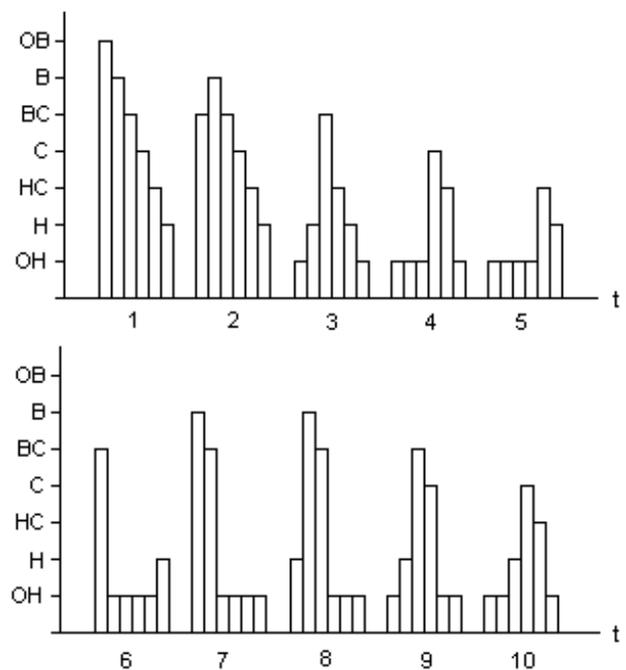


Рис. 6. Динамика возрастной структуры популяции окуня. Численности рыб в возрастных группах даны в виде качественных оценок (OB – очень высокая, B – высокая, BC – выше средней, C – средняя, HC – ниже средней, H – низкая, OH – очень низкая)

При снижении интенсивности каннибализма периодические колебания затухают, и популяция приходит к стационарному состоянию.

Логико-лингвистическая модель экологической системы озера

От модели изолированной популяции рыб естественно перейти к модели озерной экологической системы. В основу предлагаемой модели положены общие закономерности,

полученные для озер Карелии при исследовании экспертной системы, созданной по характеристикам 100 озер [Меншуткин и др., 2009]. Шкалированные величины в данном случае заменяются лингвистическими переменными. Например, биомасса бентоса оценивается как «очень низкая» при ее значениях от 0 до $2 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, «низкая» соответствует значениям от 2 до $5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, «ниже средней» – от 5 до $15 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, «средняя» – от 15 до $30 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, «выше средней» – от 30 до $50 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, «высокая» – от 50 до $100 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, «очень высокая» – выше $100 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$. Операция перехода к нечеткой переменной («фазификация» по: Борисов и др., 2007) осуществляется путем приписывания лингвистическим переменным определенных значений функции принадлежности, которые приводятся в табл. 1.

Связи между переменными (не корреляционные, как при построении экспертной системы, а причинно-следственные) описываются при помощи операций нечеткой логики [Леоненков, 2003]. В данном случае применялись операции нечеткого отрицания, дизъюнкции и конъюнкции. Например, при описании связи первичной продукции фитопланктона с освещенностью и концентрацией биогенов в воде применялась функция конъюнкции, поскольку она соответствует закону максимума Либиха. Для имитации одновременного действия на популяцию рыб естественной и промысловой смертности целесообразно использование функции дизъюнкции как аналога формулы вероятности наступления одного из двух несовместимых событий (действительно, одновременно попасть в сеть и быть съеденной хищником не представляется возможным).

После проведения всех логических операций с величинами, характеризующимися значениями функции принадлежности, наступает фаза обратного перехода от нечетких величин к лингвистическим переменным (так называемая «дефазификация»). Происходит это согласно данным табл. 1.

Блок-схема модели озера представлена на рис. 7.

Согласно классическим лимнологическим представлениям [Богословский, 1960], в сезонном цикле динамики озера выделяются следующие периоды: ледостав, весенняя циркуляция, летняя стагнация (с выделением времени

нагрева и охлаждения) и осенняя циркуляция. Для каждого временного периода (кроме периода ледостава) оцениваются составляющие теплового потока на границе между водой и атмосферой. Полагается, что радиационный баланс (QR) определяется исходя из значения балла облачности (CA). Заметим, что для определения составляющих теплового баланса озера существуют достаточно обоснованные количественные зависимости [например, Верболов и др., 1965], однако в данном случае важна только тенденция для сохранения единообразия с теми зависимостями, для которых таких количественных зависимостей не установлено.

Приведем примеры из базы знаний модели с использованием обозначений переменных на рис. 7.

1. Время разрушения ледяного покрова (A1) наступает тем позже, чем ниже температура воздуха в зимний период (TA1) и чем меньше скорость ветра в период, предшествующий вскрытию озера (WA1).

2. Коэффициент турбулентной диффузии в пограничном слое атмосферы над озером в начальный период летней стагнации (K3) тем больше, чем выше скорость ветра в этот период (WA3) и температура воздуха (TA3). Вернее было бы учитывать разность температур воды и воздуха, но температура поверхности воды изменяется в меньших пределах, чем температура воздуха.

3. При определении теплового баланса в период охлаждения во время летней стагнации (Q4) учитывается, что турбулентный поток тепла (QT4) направлен от воды в атмосферу, в противоположность тому, что имело место в предыдущий период. Радиационный баланс (QR4) и затраты тепла на испарение (QD4) сохраняют свой знак.

4. Концентрация биогенов (в основном минерального фосфора, растворенного в воде) в период весенней циркуляции (B2) определяется концентрациями биогенов в зимний период (B1) и поступлением с водосбора (BA2).

5. Первичная продукция фитопланктона в период весенней циркуляции (P2) определяется концентрацией биогенов (B2) и интенсивностью солнечной радиации, проникающей в воду. Последняя величина полагается обратной среднему баллу облачности в этот период (CA2).

Таблица 1. Соотношение шкалированных значений, лингвистических переменных и функции принадлежности

Шкала	1	2	3	4	5	6	7
Лингвистическая переменная	«очень низкая»	«низкая»	«ниже средней»	«средняя»	«выше средней»	«высокая»	«очень высокая»
Значение функции принадлежности	0.0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0

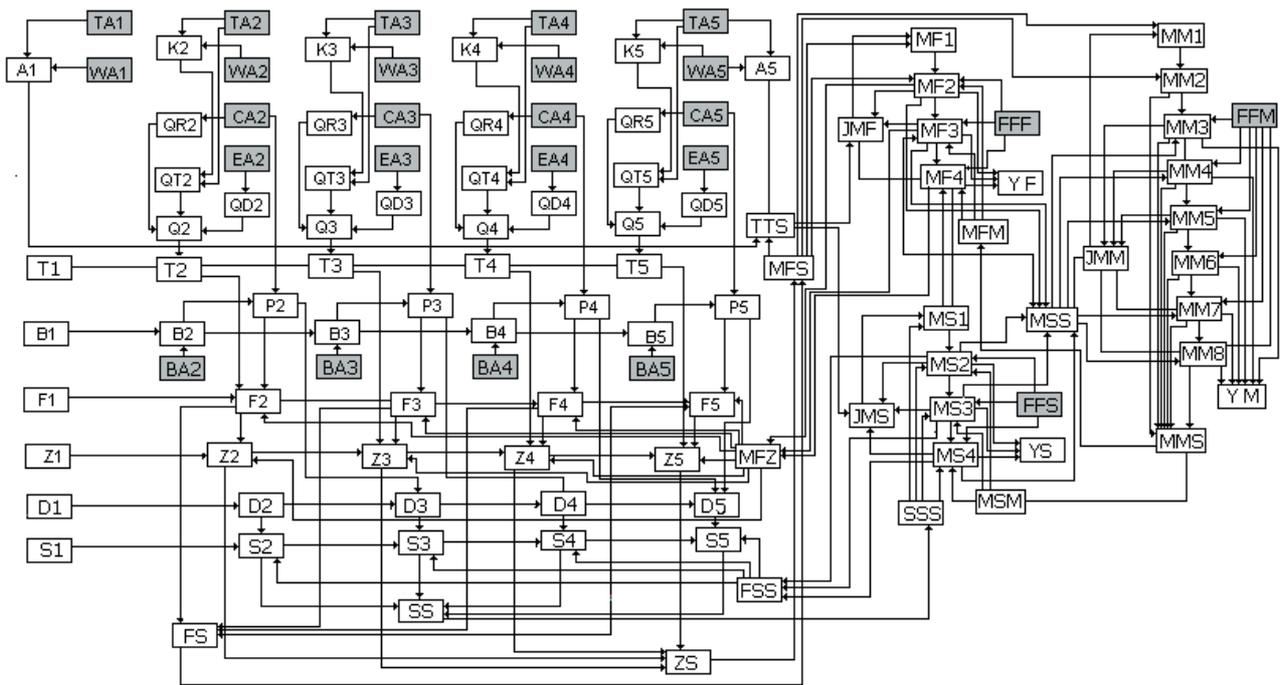


Рис. 7. Блок-схема логико-лингвистической модели озера. Внешние воздействия на водоем (на схеме отмечены серым цветом):

TA1–TA5 – температура воздуха; WA1–WA5 – скорость ветра; CA1–CA5 – облачность; EA2–EA5 – влажность воздуха; BA2–BA5 – поступление биогенов с водосбора озера; FFF, FFS, FFM – интенсивности промысла рыб-планктофагов, рыб-бентофагов и хищных рыб. Промежуточные переменные: K2–K5 – коэффициент турбулентной диффузии на границе «вода – воздух»; QR2–QR5 – радиационный баланс; QT2–QT5 – турбулентный поток тепла между поверхностью озера и атмосферой; QE2–QE5 – затраты тепла на испарение; Q2–Q5 – тепловой баланс озера; T1–T5 – температура поверхностных слоев воды; B1–B5 – концентрация растворенных биогенов в воде озера; P2–P5 – интенсивность развития фитопланктона (первичная продукция); F1–F5 – биомасса зоопланктонных фильтраторов; Z1–Z5 – биомасса хищного зоопланктона; S1–S5 – биомасса бентоса; D1–D5 – концентрация в воде мертвого органического вещества (детрита); TTS – среднегодовая температура воды; FS – годовая продукция планктонных фильтраторов; ZS – годовая продукция хищного зоопланктона; SS – годовая продукция бентоса; MF1–MF4 – биомассы возрастных групп рыб-планктофагов; JMF – воспроизводство рыб-планктофагов; MS1–MS4 – биомассы возрастных групп рыб-бентофагов; JMS – воспроизводство рыб-бентофагов; SSS – иктиомасса рыб-бентофагов; MM1–MM8 – биомассы возрастных групп хищных рыб; JMM – воспроизводство хищных рыб; MSS – YF – вылов рыб-планктофагов, YS – вылов рыб-бентофагов, YM – вылов хищных рыб

6. Развитие зоопланктонных фильтраторов в период летней стагнации (F3) определяется, с одной стороны, их биомассой в предыдущий период (F2) и обилием корма в виде фитопланктона (P3), но, с другой стороны, воздействием потребителей в виде рыб-планктофагов (MFZ) и хищного зоопланктона. Кроме этого, на развитие фильтраторов оказывает влияние температура воды (T3).

7. Развитие хищного зоопланктона в период летней стагнации (Z3) определяется кормовой базой в виде зоопланктонных фильтраторов (F3), температурой воды (T3) и давлением со стороны рыб-планктофагов (MFZ).

8. Биомасса бентоса (S3) зависит от поступления мертвого органического вещества – детрита (D3) и воздействия со стороны рыб-бентофагов (FSS).

9. Иктиомасса рыб-планктофагов возраста 2+ (MF3) определяется иктиомассой тех же рыб возраста 1+ в предыдущем году (MF2), а также воздействием со стороны хищных рыб (MSS) и промысла (FFF). Кроме этого, учитываются кормовые условия (MFS).

10. Воспроизводство рыб-планктофагов (JMF) зависит от величины нерестового стада (MF2, MF3, MF4) и температурных условий в водоеме (TTS).

11. Иктиомасса хищных рыб возраста 4+ (MM5) определяется иктиомассой тех же рыб возраста 3+ в предыдущем году (MM4), а также воздействием со стороны промысла (FFM). Кроме этого, учитываются кормовые условия (MSS).

12. Величина вылова хищных рыб (YM) зависит от иктиомассы хищных рыб (MM3, MM4, MM5, MM6, MM7, MM8) и интенсивности промысла (FFM).

В табл. 2 представлены результаты исследования реакции модели озерной системы на изменение входных переменных. Резкое увеличение температуры воздуха (TA) приводит не только к повышению температуры воды, но и к росту биомассы планктона и бентоса. Через 2–3 года после резкого потепления увеличивается и иктиомасса рыб. Увеличение скорости ветра (WA) ведет к аналогичным последствиям, но в меньшем размере. Снижение среднего балла облачности над озером (CA) и, как следствие,

увеличение инсоляции приводит к незначительному снижению температуры воды (за счет усиления длинноволнового излучения с поверхности озера в атмосферу). При этом биомасса планктона немного повышается, а биомасса бентоса немного снижается. Ихтиомасса рыб также претерпевает незначительные изменения, причем у рыб-планктофагов она растет, а у бентофагов и хищных рыб – сокращается.

Существенное повышение поступления биогенов с водосбора в озеро (BA) не приводит к изменению температуры воды, зато биомассы планктона и бентоса, а за ними и ихтиомассы рыб возрастают. Усиление промысла рыб-планктофагов (FFF) ведет к росту биомассы планктона при незначительном сокращении биомассы бентоса. Ихтиомасса рыб-планктофагов резко сокращается, а ихтиомасса рыб-бентофагов немного повышается, при этом ихтиомасса хищных рыб становится ниже средней. Усиление промыслового воздействия на рыб-бентофагов (FSS) приводит к обратному эффекту: биомасса бентоса растет, а зоопланктона – сокращается, но в отличие от предыдущего примера ихтиомасса хищных рыб принимает значение «выше среднего». Усиление промысла хищных рыб (FFM) ведет к небольшому сокращению биомасс планктона и бентоса. В случае усиленного промыслового воздействия на всех рыб биомасса планктона и бентоса существенно возрастает. При сокращении промыслового воздействия больше всего возрастает ихтиомасса хищных рыб.

Обсуждение

Особенность предложенного метода логико-лингвистического моделирования популяций рыб заключается в том, что размытость и неопределенность состояния популяции заложена в

них изначально при словесной формулировке численностей рыб в возрастных группах и темпе их роста. Поэтому для моделей такого типа несущественно то лавинообразное нарастание неопределенности, которое было продемонстрировано в начале этой статьи на примере модели с использованием арифметики нечетких чисел.

Другая особенность заключается в полном отсутствии каких-либо математических формул при описании модели. Для практического применения это существенно, хотя достигается это свойство очень дорогой ценой создания громоздкой базы знаний, состоящей, даже для не слишком сложного примера, из сотен высказываний. Анализ того, как делаются реальные и очень ответственные промысловые прогнозы (например, опыт работы советско-японской рыболовной комиссии (СЯРК), экспертом которой некогда был автор настоящей статьи), показывает, что исходный материал и алгоритм такого прогноза (во всяком случае для дальневосточных лососей) строился вовсе не на основании моделей, а на основании прецедентов и знаний специалистов, которые имели первоначально вербальную форму [Меншуткин, 1969]. Модели создавались исходя из высказываний ихтиологов с большим практическим опытом (например, Ф. В. Крогиус [1961]) и служили, скорее, средством компактного обобщения этих высказываний, а не средством практического прогнозирования. Применение логико-лингвистических моделей позволяет использовать опыт практиков-ихтиологов в первоизданном виде со всеми нюансами и оттенками, которые обычно пропадают при моделировании в виде математических уравнений.

В практике ихтиологических исследований обращение к аппарату искусственного интеллекта становится обычным явлением [Saila

Таблица 2. Результаты воздействия входных переменных на состояние озерной системы

Входная переменная	Значение переменной	Величины, характеризующие состояние озерной системы					
		Температура воды (TTS)	Биомасса планктона (MFZ)	Биомасса бентоса (SS)	Ихтиомасса рыб-планктофагов (MFM)	Ихтиомасса рыб-бентофагов (MSS)	Ихтиомасса хищных рыб (MMS)
Температура воздуха (TA)	ОВ	В	В	В	ВС	ВС	ВС
Скорость ветра (WA)	ОВ	ВС	ВС	ВС	ВС	ВС	ВС
Облачность (CA)	ОН	НС	ВС	НС	ВС	НС	НС
Поступление биогенов (BA)	В	С	В	В	ВС	ВС	ВС
Промысел рыб-планктофагов (FFF)	В	С	В	НС	ОН	В	НС
Промысел рыб-бентофагов (FSS)	В	С	НС	В	ВС	ОН	ВС
Промысел хищных рыб (FFM)	В	С	НС	НС	В	В	ОН
Промысел всех рыб	В	С	В	В	ОН	ОН	ОН

Примечание. Обозначение состояний лингвистических переменных: ОН – очень низкое, Н – низкое, НС – ниже среднего, С – среднее, ВС – выше среднего, В – высокое, ОВ – очень высокое.

et al., 1997; Robb, Peterman, 1998; Mackinson, 2000], но до систематического его применения еще далеко. В области моделирования экологических систем подобные методы применяются гораздо шире [Lembach, 1994; Droesen, 1996; Keller, Dungan, 1999]. Особенно ценным представляется опыт чешских исследователей [Sterbacek et al., 1990], которые сумели соединить модель, построенную на балансовом принципе, с экспертной системой для оценки параметров этой модели и результатов моделирования. Детали реализации экспертной части гибридной модели могут быть самыми различными [Tuma et al., 1996] – от двужанной логики до нейронных сетей или аппарата размытых множеств (fuzzy sets).

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ № 08-05-756.

Литература

- Богословский Б. Б. Озероведение. М.: МГУ, 1960. 336 с.
- Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия. Телеком, 2007. 282 с.
- Верболов В. И., Сокольников В. М., Шимараев М. Н. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. М.; Л.: Наука, 1965. 374 с.
- Жаков Л. А., Меншуткин В. В. Практические занятия по ихтиологии: Учебное пособие. Ярославль: Ярославский ун-т, 1982. 112 с.
- Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
- Крогиус Ф. В. Японский лососевый промысел в открытом море и его влияние на запасы красной // Рыбное хозяйство. 1961. № 2. С. 23–36.
- Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FUZZY TECH. СПб.: БХВ, 2003. 736 с.
- Меншуткин В. В. Опыт прогнозирования динамики численности озерной красной на основе кибернетической модели этого стада // Труды ВНИРО. 1969. Т. 67. С. 88–100.
- Меншуткин В. В. Математическое моделирование популяций и сообществ водных животных. Л.: Наука, 1971. 196 с.
- Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., Потахин М. С. Экспертная система «Озера Карелии». Ординальные и номинальные характеристики озер // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 2. С. 160–171.
- Попов Э. В., Фоминых И. Б., Кисель Е. Б., Шапот М. Д. Статические и динамические экспертные системы. М.: Финансы и статистика, 1996. 320 с.
- Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системе управления. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.
- Поспелов Д. А. (ред.). Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Наука, 1986. 312 с.
- Тутубалин В. Н., Барбашева Ю. М., Григорян А. А., Девятков Г. И. Математическое моделирование в экологии: историко-методологический анализ. М.: Языки русской культуры, 1999. 208 с.
- Форсайт Р. (ред.). Экспертные системы. Принципы работы и примеры. М.: Радио и Связь, 1987. 223 с.
- Chen D., Hargreaves D. M., Lui Y. A fuzzy logic model with genetic algorithm for analyzing stock-recruitment relationships // Canadian Journal of Fishery and Aquatic Science. 2000. Vol. 57 (3). P. 1878–1887.
- Droesen W. J. Formalization of ecohydrological expert knowledge applying fuzzy techniques // Ecological Modelling. 1996. Vol. 85 (1). P. 75–81.
- Hannon B., Ruth M. Modeling dynamic biological systems. NY; Berlin: Springer, 1997. 400 p.
- Kaufman A., Gupta M. Introduction to fuzzy arithmetic: theory and applications. NY: VanNostrand Reinhold, 1985.
- Keller R. H., Dungan J. L. Meta-modelling: a knowledge-based approach to facilitating process model construction and reuse // Ecological Modelling. 1999. Vol. 119 (2–3). P. 89–116.
- Lembach M. Expert system – model coupling with the framework of an ecological advisory system // Ecological Modelling. 1994. Vol. 75/76. P. 589–600.
- Mackinson S. An adaptive fuzzy expert system for predicting structure, dynamics and distribution of herring shoals // Ecological Modelling. 2000. Vol. 126 (2–3). P. 155–178.
- Recnagel F., Petzoldt T., Jaenke O., Krusche F. Hybrid expert system DELAQUA – a toolkit for water quality control of lakes and reservoirs // Ecological Modelling. 1994. Vol. 71 (1–3). P. 17–36.
- Robb C. A., Peterman R. M. Application of Bayesian decision analysis to management of a sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) fishery // Canadian Journal of Fishery and Aquatic Science. 1998. Vol. 55 (1). P. 86–98.
- Saila S. B., Lorda E., Miller J. D. et al. Equivalent adult estimates for losses of fish eggs, larvae and juveniles at Seebrook Station with use fuzzy logic to represented parametric uncertainty // North American Journal of Fishes Management. 1997. Vol. 17 (4). P. 811–825.
- Salski A. Fuzzy knowledge-based models in ecological research // Ecological Modelling. 1992. Vol. 63 (1). P. 103–112.
- Starfield A. M., Farm B. P., Taylor R. H. A rule-based ecological model for management of an estuarine lake // Ecological Modelling. 1989. Vol. 46 (1–2). P. 107–119.
- Sterbacek Z., Skopek V., Zavazal V. A composite landscape ecology prognostic expert system – COLEPS. Part I // Ecological Modelling. 1990. Vol. 50 (1–3). P. 145–156.
- Tuma A., Haasis H.-D., Rentz O. A comparison of fuzzy expert systems, neural networks and neuro-fuzzy approaches. Controlling energy and water flows // Ecological Modelling. 1996. Vol. 85 (1). P. 93–98.
- Zade L. A. Fuzzy logic = computing with words // Computing with words in information intelligent system (eds. Zade L. A., Kacprzyk J). 1999. Physia Verlag, Heidelberg. P. 3–23.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Меншуткин Владимир Васильевич
главный научный сотрудник, д. б. н.
Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН
ул. Чайковского, 1, Санкт-Петербург
эл. почта: vvm@emi.nw.ru
тел.: (812) 2737953

Menshutkin, Vladimir
St. Petersburg Institute of Economics and Mathematics, Russian Academy of Science
1 Chaikovsky St., St. Petersburg
e-mail: vvm@emi.nw.ru
tel.: (812) 2737953