

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.555.7+574

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА “ОЗЕРА КАРЕЛИИ”. 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ОЗЕР

© 2009 г. В. В. Меншуткин*, Н. Н. Филатов**, М. С. Потахин**

*Санкт-Петербургский Экономико-математический институт Российской академии наук
191187 Санкт-Петербург, ул. Чайковского, 1**Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук
185030 Петрозаводск, просп. А. Невского, 50

Поступила в редакцию 20.02.2008 г.

Приведены алгоритмы построения экспертной системы. Даны результаты использования экспертной системы для оценки трофического статуса озер Карелии. Тестирование системы проведено на независимых данных для хорошо изученных озер. Выполнена классификация озер с использованием аппарата нечеткой логики.

ПОСТРОЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЕРА ПО ДРУГИМ

Для того чтобы иметь возможность определить одни характеристики озера, если известны какие-либо другие его характеристики (например, оценить возможный состав ихтиофауны, или биомассу бентоса, зная площадь озера), целесообразно представить характеристики озера в виде нечетких множеств, а для определения одних характеристик озера по другим применить аппарат нечеткой логики [17, 23, 33]. В последние годы имеется определенный опыт применения в лимнологии аппарата нечетких множеств и нечеткой логики [31, 34, 35, 36].

Если об озере не известно ничего, кроме того, что это озеро принадлежит к множеству озер Карелии, то функции принадлежности (membership function) этого озера будут такими, как это представлено на рис. 1.

Определение функции принадлежности неизвестной характеристики озера μ_C по данным о функции принадлежности другой характеристики озера μ_A и отношению между этими двумя характеристиками, согласно матрице M_{AC} , производится при помощи нечеткого логического вывода (нечеткой импликации) [11, 29]

$$\mu_C(i) = \max_{j \in N} \min(\mu_A(j), \mu_{AC}(j, i)), \quad (1)$$

здесь N – множество всех интервалов шкалирования. Вычисления [22] формально похожи на операцию умножения вектора на матрицу, только умножение заменяется нахождением минимума, а сложение – нахождением максимума.

Пример применения нечеткой импликации приведен на рис. 2, где по нечеткому заданию площади озера определены функции принадлежности всех

других его характеристик, а на рис. 3 дан пример принадлежности числа рыб в ихтиоценозе.

На рис. 4. дан интерфейс экспертной системы ЭС для озер, созданный с использованием имеющегося опыта [26, 27]. Интерфейс представляет собой изображение семантической сети, в вершинах которой расположены характеристики озера, а дуги соответствуют операциям нечеткого логического вывода. В программной интерпретации, которая выполнена на языке Visual Basic 6.0, щелчок мышью по этикетке, расположенной на дуге, вызывает вычисление соответствующей нечеткой импликации. В том случае, когда одна характеристика определяется на основании двух или более других характеристик (вершина графа семантической сети имеет несколько заходящих активных дуг), применяется операция нечеткой конъюнкции

$$\mu_{AB}(i) = \min(\mu_A(i), \mu_B(i)). \quad (2)$$

Кроме минимаксной нечеткой логики возможно применение вероятностной модификации конъюнкции в виде

$$\mu_{AB}(i) = \mu_A(i) * \mu_B(i) \quad (3)$$

На рис. 4 представлены последовательные стадии работы ЭС по определению ИСН от полного отсутствия дополнительной информации до исчерпания возможностей системы в данном конкретном случае. Неопределенность величины ИСН снижается от $E = 2.65$ до $E = 1.05$. Эта величина рассчитывалась по формуле

$$E = \sum_{i=1}^N -\mu(i) * LN(\mu(i) - (1 - \mu(i)) * LN(1 - \mu(i))). \quad (4)$$

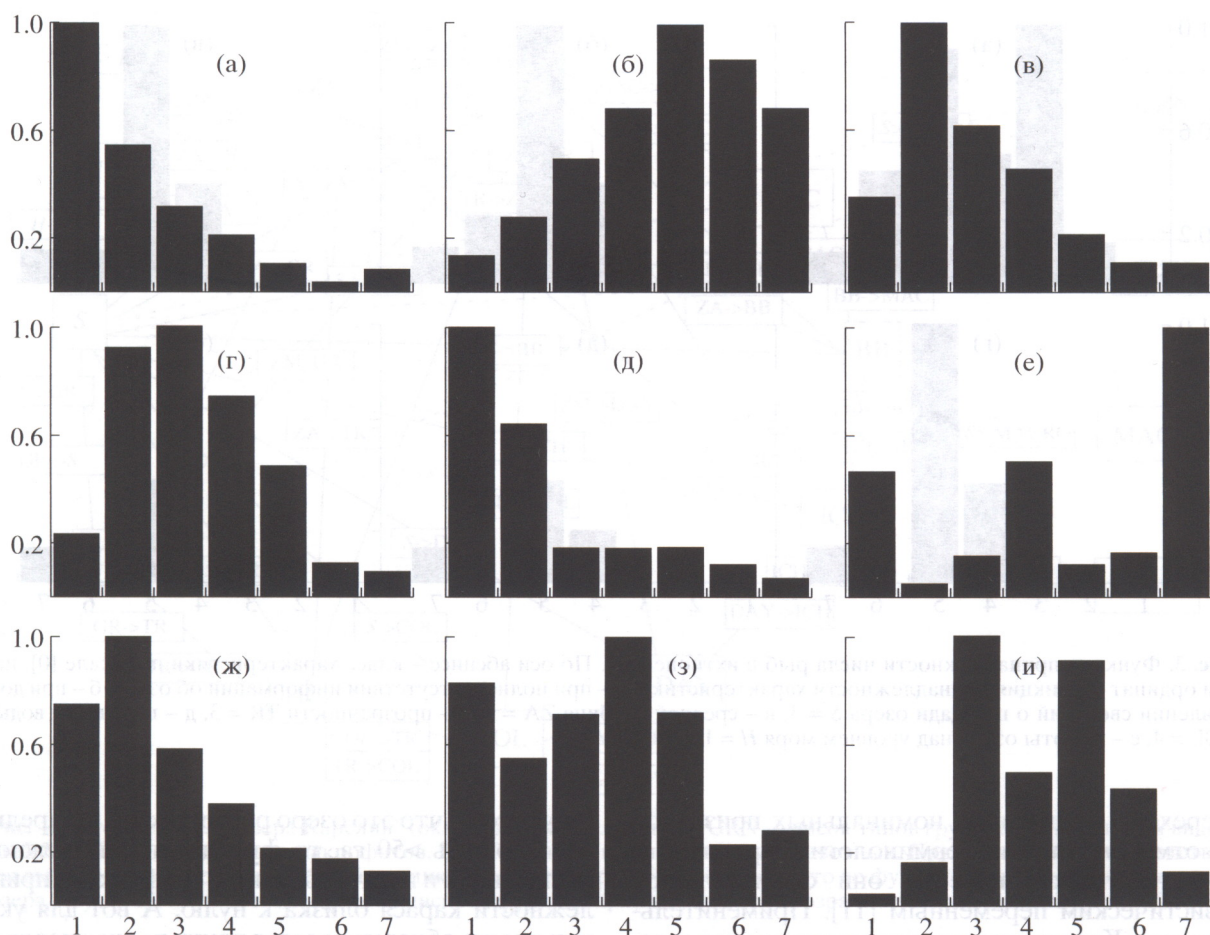


Рис. 1. Функции принадлежности характеристик озер Карелии при отсутствии информации обо всех прочих характеристиках. Здесь и на рис. 3 по оси абсцисс – класс характеристики по шкале [22], по оси ординат – функция принадлежности характеристики. а – S , б – H , в – ZA , г – ZM , д – TR , е – COL , ж – BB , з – MAC , и – ICH . (S – площадь озера, H – высота над уровнем моря, ZA – средняя глубина, ZM – максимальная глубина, TR – прозрачность воды по диску Секки, COL – цветность воды, BB – биомасса бентоса, MAC – число видов макрофитов, ICH – число видов рыб в ихтиоценозе озера).

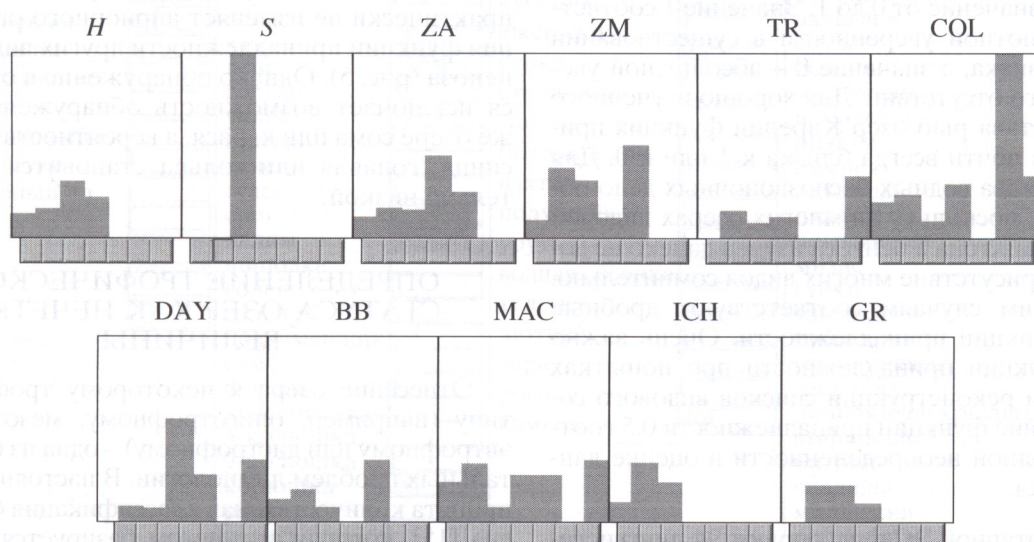


Рис. 2. Пример работы ЭС. Задана площадь озера в диапазоне от 40 до 110 км² (градация 3 шкалы). Функции принадлежности остальных характеристик получены при помощи нечеткой импликации. (DAY – сумма градусо-дней, GR – число типов грунтов).

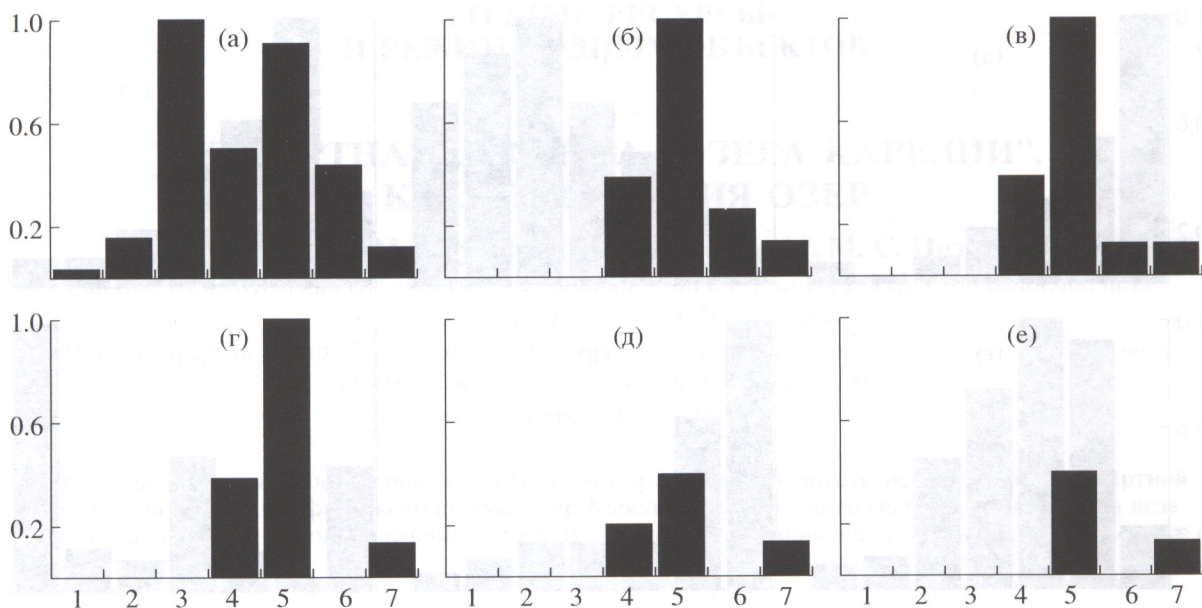


Рис. 3. Функция принадлежности числа рыб в ихтиоценозе. По оси абсцисс – класс характеристики по шкале [0], по оси ординат – функция принадлежности характеристики. а – при полном отсутствии информации об озере, б – при добавлении сведений о площади озера $S = 3$, в – средней глубине $ZA = 3$, г – прозрачности $TR = 3$, д – цветности воды $COL = 4$, е – высоты озера над уровнем моря $H = 1$.

Переходя к описанию номинальных признаков озер, отметим, что по терминологии, принятой в теории нечетких множеств, они соответствуют лингвистическим переменным [11]. Применительно к озерам Карелии к таким переменным относятся характеристики грунтов, списки видов рыб, макрофитов и бентоса. Если при традиционном рассмотрении такая переменная могла принимать только два значения (например, в данном озере или есть элодея, или ее в нем нет), то в теории нечетких множеств функция принадлежности может принимать любое значение от 0 до 1. Значение 1 соответствует абсолютной уверенности в существовании данного признака, а значение 0 – абсолютной уверенности в его отсутствии. Для хорошо изученного видового состава рыб озер Карелии функция принадлежности почти всегда близка к 1 или к 0. Для видового состава водных беспозвоночных дело обстоит не так, поскольку на многих озерах видовой состав зоопланктона и бентоса изучен далеко не достаточно и присутствие многих видов сомнительно. Именно таким случаям соответствуют дробные значения функции принадлежности. Очень важно понятие функции принадлежности при попытках прогноза или реконструкции списков видового состава. Значение функции принадлежности 0.5 соответствует полной неопределенности в оценке данного признака.

В разработанной ЭС фигурируют 94 лингвистические переменные, функции, принадлежности которых отображаются на интерфейсе, представленном на рис. 4. Если об озере ничего не известно,

кроме того, что это озеро расположено в Карелии и его площадь >50 га, то функции принадлежности окуня, щуки и плотвы близки к 1, а функция принадлежности карася близка к нулю. А вот для уклеи или рдеста обнаруживается почти полная неопределенность, так как их априорные функции принадлежности близки к 0.5. Вся дальнейшая работа экспертной системы заключается в том, чтобы уточнить эти функции, вводя в систему дополнительную информацию о характеристиках озера.

Информация о том, что в озере обитает окунь, практически не изменяет априорного распределения функций принадлежности других видов ихтиоценоза (рис. 5). Однако обнаружение в озере лосося исключает возможность обнаружения в этом же озере сома или карася, а вероятность встретить синца, голавля или гольца становится исключительно низкой.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ОЗЕР КАК НЕЧЕТКОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Отнесение озера к некоторому трофическому типу (например, олиготрофному, мезотрофному, эвтрофному или дистрофному) – одна из фундаментальных проблем лимнологии. В настоящей работе принята количественная классификация С.П. Китаева [15], которая во многом базируется на опыте изучения озер Карелии (табл. 1). Как уже отмечалось выше, трудность применения таких таблиц заключается в противоречивости оценок по различ-

Таблица 1. Нижние границы интервалов шкалирования трофического статуса озер (по [15] с сокращениями)

Трофический статус озера	Концентрация Хл “а”, мг/м ³	Суточная первичная продукция	Годовая первичная продукция
		г С/м ² сут	
α-олиготрофный	0.00	0.00	0.00
β-олиготрофный	1.50	0.13	12.50
α-мезотрофный	3.00	0.25	25.00
β-мезотрофный	6.00	0.50	50.00
α-эвтрофный	12.00	1.00	100.00
β-эвтрофный	24.00	2.00	200.00
Гиперэвтрофный	48.00	4.00	400.00

ным характеристикам. Другая трудность заключается в том, что далеко не для всех озер Карелии есть измерения таких важных для оценки трофического статуса величин как первичная продукция фитопланктона или концентрация Хл “а”. Выход из создавшегося положения заключается в том, чтобы считать трофический статус озера величиной нечеткой и, тем самым, свести операцию определения трофического статуса озера к вычислению функции принадлежности этой величины. Трудность с недостатком данных по прямому определению продуктивности фитопланктона (имеются данные всего по 24 озерам) может быть преодолена путем придания ЭС свойства приобретения знаний. Иными словами, предлагается на основании 20 измерений первичной продукции фитопланктона установить связи этой характеристики с остальными характеристиками озер, которые уже есть в базе данных (БД) ЭС. Оставшиеся четыре озера целесообразно оставить для “экзамена” системы, т.е. для получения при помощи системы оценки трофического статуса озер, уже известного по данным непосредственных наблюдения. Результаты этого “экзамена” позволяют судить о качестве работы системы. После такой проверки появляется возможность оценки трофического статуса озер, для которых измерения первичной продукции не проводились.

Интерфейс ЭС, отображающий процесс оценки трофического статуса озера, представлен на рис. 6. По сравнению с примерами, рассмотренными выше, БД системы расширена за счет добавления данных о показателе развития береговой линии КМ, коэффициенте условного водообмена KW, показателе относительной глубины ALFA, сумме неорганических ионов SI, концентрации водородных ионов pH, концентрации органического вещества в воде BO, биологическом потреблении кислорода BDO5, концентрации общего железа TFE, концентрации общего фосфора TP, концентрации общего азота TN, концентрации Хл “а” CHLA, максимальной продукция фитопланктона AMAX, суммарной

суточной первичной продукции SUM_D, суммарной годовой первичной продукции SUM_Y. Все эти данные подвергнуты операции шкалирования, которая описана выше.

На рис. 7 представлены результаты “экзамена” ЭС при определении трофического статуса α-мезотрофного оз. Среднее Куйто и α-эвтрофного оз. Миккельского по данным о годовой первичной продукции фитопланктона. Гистограмма представляет собой функцию принадлежности величины трофического статуса, полученную при помощи ЭС при введении в нее сведений о морфометрии, гидрологии и гидрохимии этих озер. При создании ЭС данные по озерам Среднему Куйто и Миккельскому не использовались. Заметим, что оценка по концентрации Хл “а” или максимальной суточной продукции фитопланктона дает несколько другие оценки. Для начального этапа разработки ЭС результаты “экзамена” следует признать удовлетворительными.

Попытку оценить трофический статус озера только по его морфологическим характеристикам следует признать неудачной (рис. 8). В большинстве случаев функция принадлежности оказывалась сильно размытой. Так, для уже упомянутого оз. Среднее Куйто выдавались оценки от α-олиготрофного до гиперэвтрофного. Результат этого эксперимента следует интерпретировать в смысле невозможности оценки трофического статуса озера исключительно по морфометрическим данным. Несколько лучшими, но далеко не удовлетворительными оказались попытки оценки трофического статуса озер только по гидрохимическим данным. Оценка оз. Среднее Куйто как гиперэвтрофного в этом случае не отмечалась, но высокая энтропия функции принадлежности сохранилась.

На рис. 9 представлена оценка трофического статуса озер, по которым нет данных по первичной продукции фитопланктона. В целом, результаты соответствуют тем оценкам, которые давались озерам совершенно независимыми методами, например по видовому составу хирономид [10, 13] или с применением геохимической классификации поверхностных вод гумидной зоны [9, 14, 20]. Несколько странной оказалась оценка трофического статуса оз. Долгая Ламба, для которого функция принадлежности трофического статуса полимодальна. Хотя это единственный случай для всех 100 исследованных озер, он показывает, что “проклятие” неоднозначности оценки, отмеченное в [30] на примере американских озер, не всегда удается преодолеть даже современными методами искусственного интеллекта.

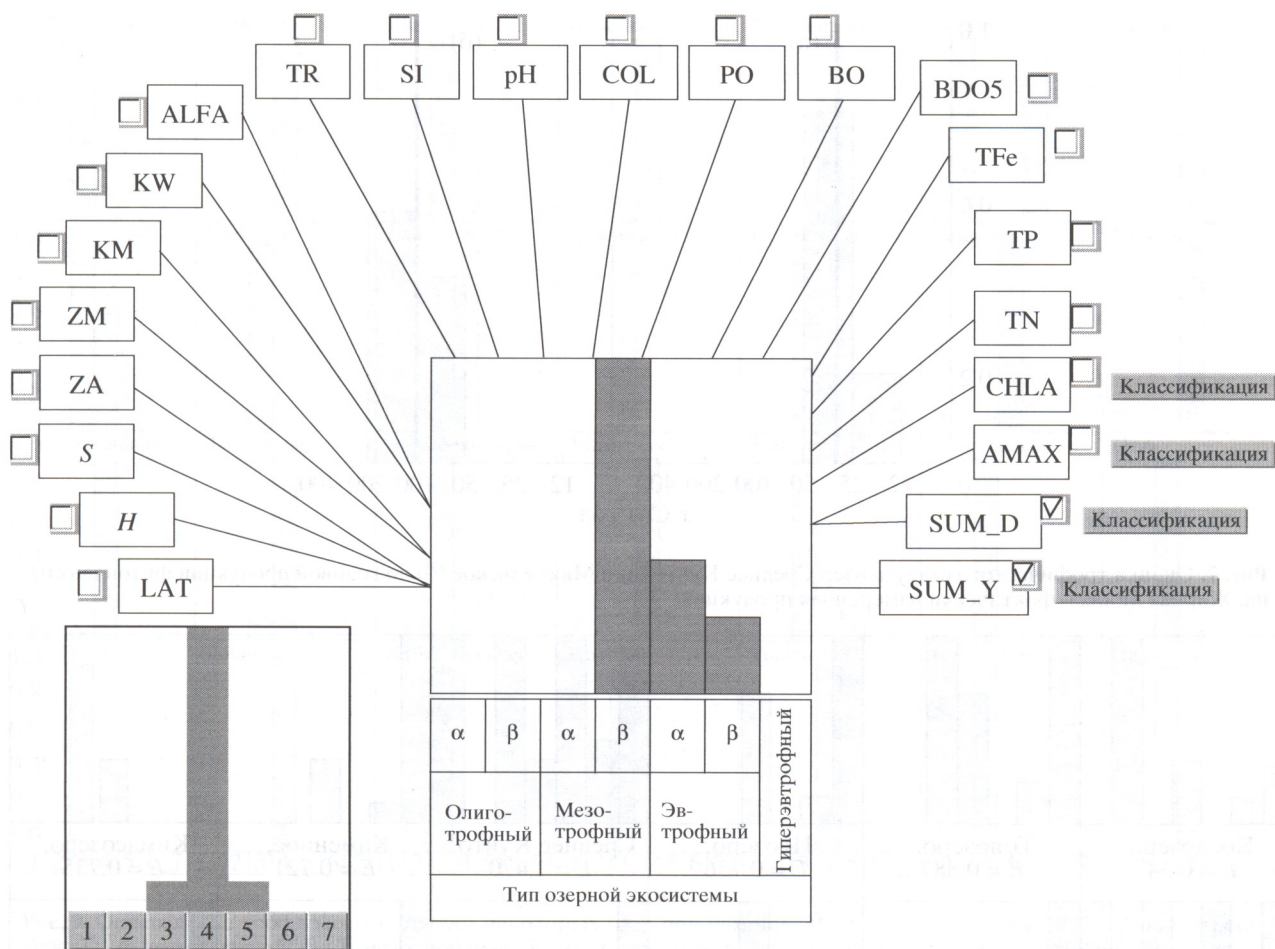


Рис. 6. Интерфейс ЭС (окно определения трофического статуса озера). LAT – географическая широта расположения озера, H – высота над уровнем моря, S – площадь озера, ZA, ZM – средняя и максимальная глубина соответственно, KM – показатель развития береговой линии, KW – коэффициент условного водообмена, ALFA – показатель относительной глубины, TR – прозрачность по диску Секи, SI – сумма неорганических ионов, pH – концентрация водородных ионов, COL – цветность воды, PO – перманганатная окисляемость, BO – концентрация органического вещества в воде, BDO5 – биологическое потребление кислорода, TFe, TP, TN – концентрация общего железа, общего фосфора и общего азота соответственно, CHLA – концентрация Хл “а”, AMAX – максимальная продукция фитопланктона, SUM_D, SUM_Y – суммарная суточная и суммарная годовая первичная продукция соответственно. Клавиши 1–7 и окно отображения функции принадлежности в левой части интерфейса служит для ввода исходных данных. Флажки у каждой переменной необходимы для включения данной переменной в процесс определения трофического статуса озера. Клавиши “Классификация” предназначены для выбора характеристики, по которой проводится оценка трофического статуса.

КЛАССИФИКАЦИЯ ОЗЕР КАРЕЛИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

Теперь в нашем распоряжении имеются оценки трофического статуса всех 100 озер, учтенных в классификации. Эти оценки, как показано выше, не всегда надежны, но, что очень важно для классификационных построений, получены одним и тем же методом. Учитывая отмеченные выше ограничения в применении факторного анализа, сразу перейдем к применению метода многомерного шкалирования. Первичная матрица расстояний между озерами в многомерном пространстве их характеристик строилась на основе всех наличных данных с учетом по-

лученных в результате работы ЭС. Хотя значимость отдельных характеристик озера заведомо различна (например, средняя глубина озера и факт обнаружения в озере плотвы), никаких весовых коэффициентов не вводилось. Результаты приведены на рис. 10.

Классификация, проведенная методом k -средних, обладала теми же недостатками, что и классификация при помощи дендрограмм [22]. Однозначное отнесение каждого озера к определенному кластеру приводило к неустойчивой классификации, при которой небольшое изменение параметров давало различное разбиение множества озер на кластеры.

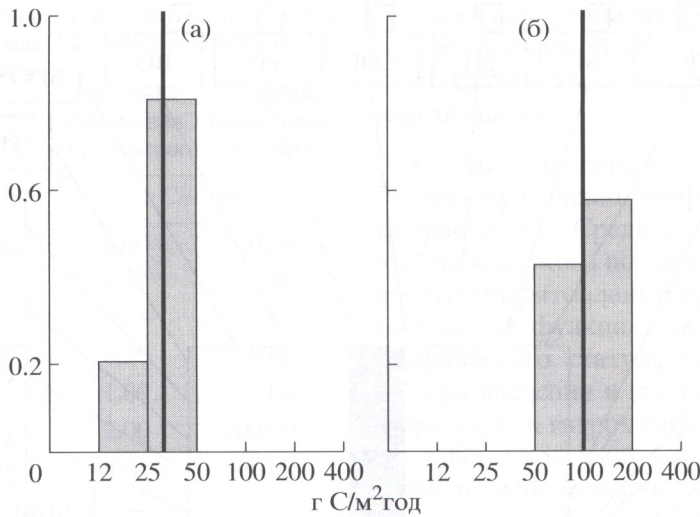


Рис. 7. Оценка трофического статуса озер Среднее Куйто (а) и Миккельское (б) по годовой продукции фитопланктона. Жирная линия – фактически измеренная продукция.

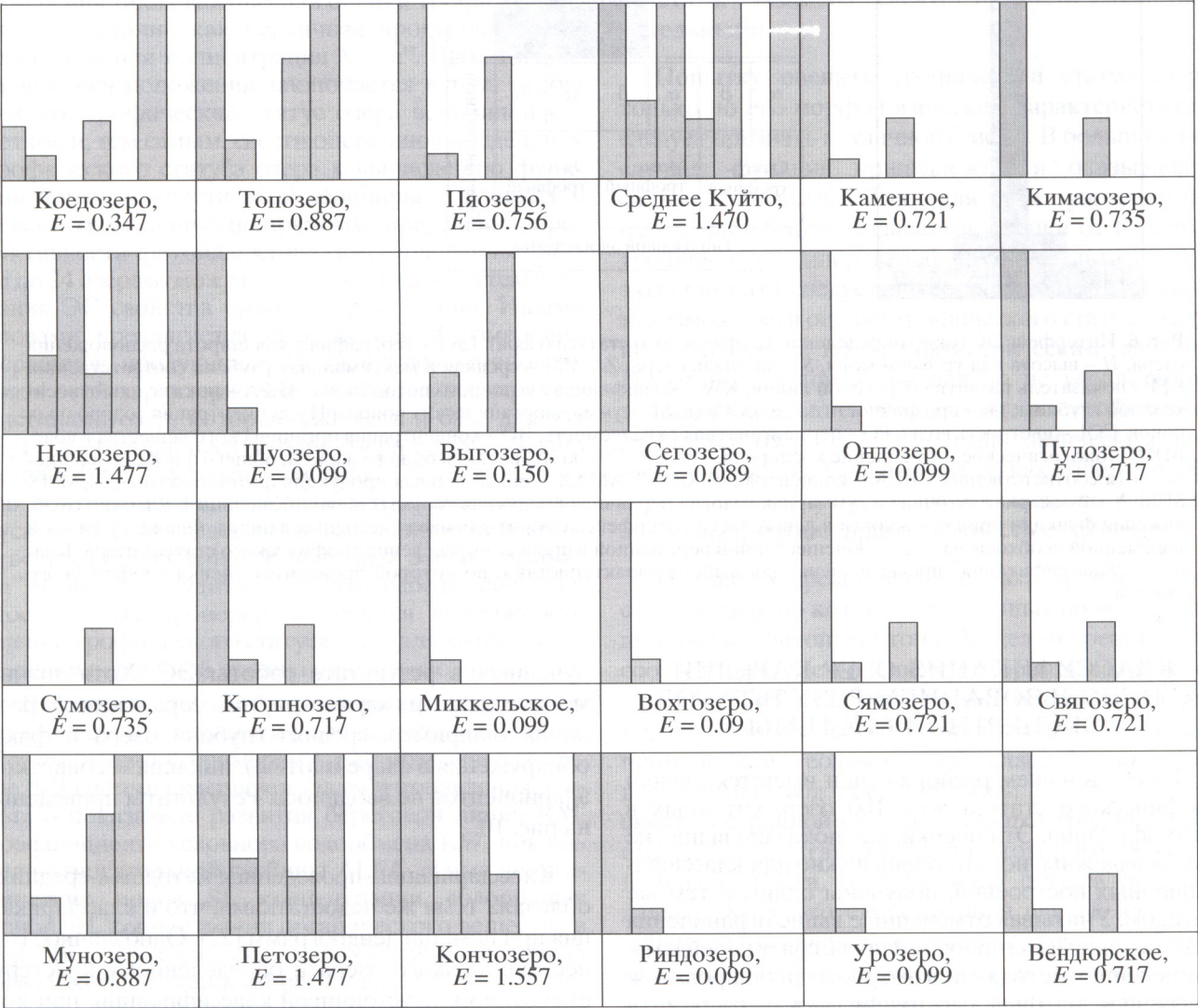


Рис. 8. Функции принадлежности трофического статуса 24 озер Карелии, полученные на основании только морфометрических характеристик озер.

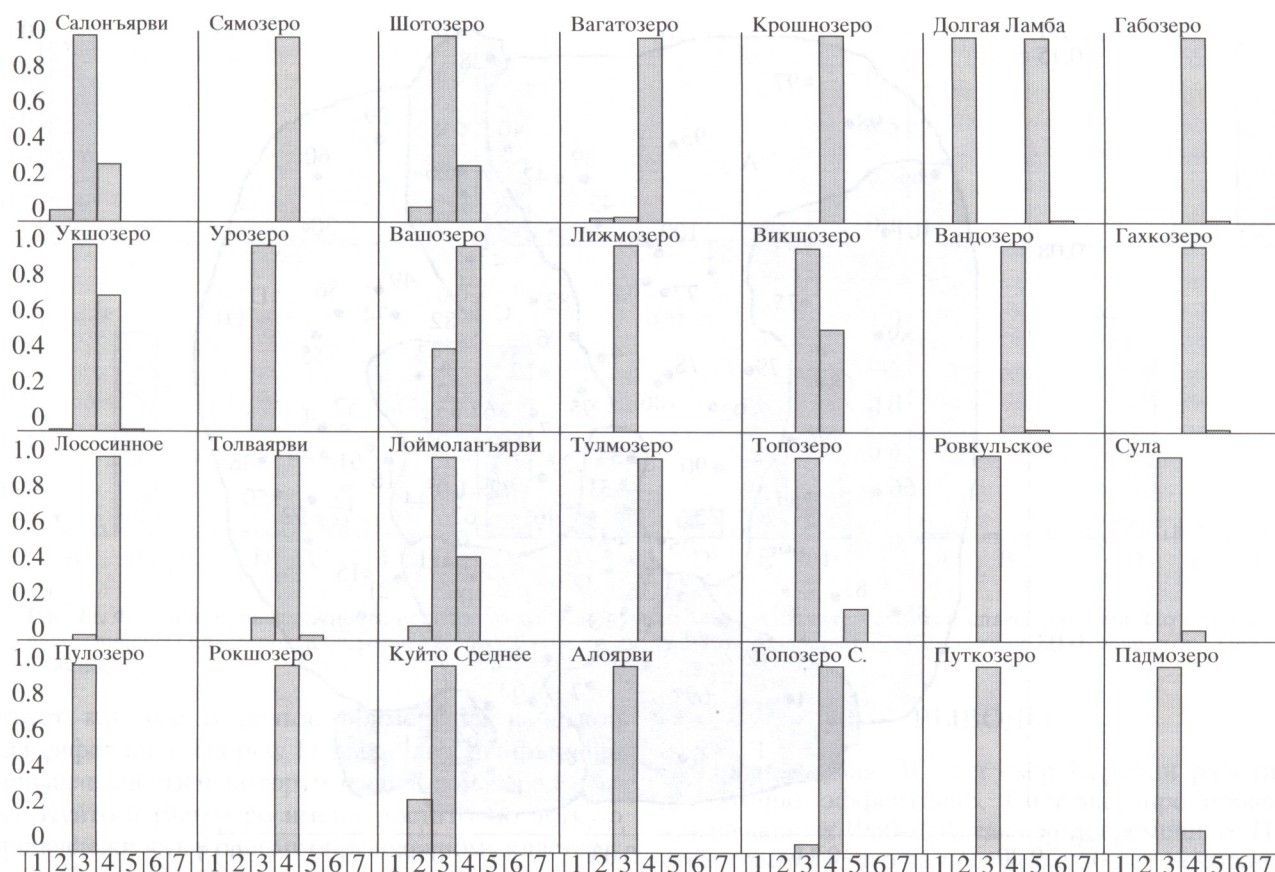


Рис. 9. Определение трофического статуса некоторых озер при помощи ЭС. 1 – α -олиготрофный, 2 – β -олиготрофный, 3 – α -мезотрофный, 4 – β -мезотрофный, 5 – α -эвтрофный, 6 – β -эвтрофный, 7 – гиперэвтрофный тип озера. Функции принадлежности нормированы.

Был применен метод нечеткой классификации [1, 21]. Сущность простейшего алгоритма нечеткой классификации заключается в отыскании таких значений функции принадлежности μ_{ik} каждого озера i к каждому кластеру k , которое минимизировало бы функционал

$$C = \sum_{k=1}^K \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \mu_{ik} \mu_{jk} d_{ij}}{2 \sum_{j=1}^N \mu_{jk}^2}, \quad (5)$$

здесь d_{ij} – расстояние между озерами, которое уже использовалось при многомерном шкалировании, N – общее число озер. Число кластеров $K = 6$.

Качество классификации определяется при помощи коэффициента S , который представляет собой соотношение среднего расстояния озера от других озер внутри своего кластера a и среднего расстояния данного озера от озер ближайшего кластера b

$$S = 1 - \frac{a}{b}. \quad (6)$$

В данном случае величина коэффициента S максимальна для кластера B , а в целом по всему множеству озер составляет 0.26. Это соответствует слабо-структурированным системам. Было проверено, что изменением числа кластеров не удастся добиться более высоких значений коэффициента S . Высокая гомогенность и отсутствие резких переходов от озера к озеру, возможно, является отличительной чертой Карельской озерной системы. С этим связан разнородность и противоречивость классификационных схем, о которых говорилось выше.

Некоторые средние характеристики озер в выделенных кластерах приведены в табл. 2. Наиболее типичным представителем каждого кластера считается то озеро, которое имеет минимальную размытость функции принадлежности. Первый кластер A объединяет большие олиготрофные озера севера Карелии (Топозеро, Пяозеро). Ожидаемого низкого класса трофности в этих озерах ЭС не выявила, очевидно, в силу высокой прозрачности воды и, следовательно, большой мощности фотического слоя. Поскольку в данном примере трофность оценивается по годовой первичной продукции под 1 м² поверхности озера, то становится понятным отнесе-

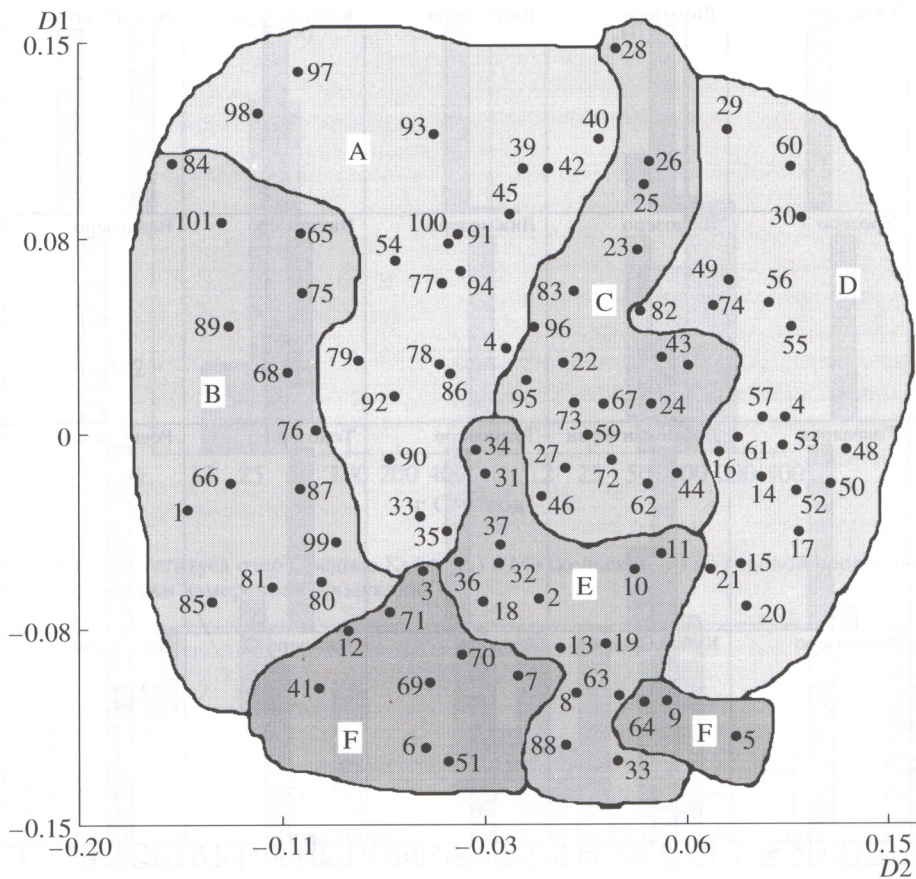


Рис. 10. Расположение 100 озер Карелии в координатах *D1* и *D2* с использованием 10 порядковых характеристик и списков видов рыб, макрофитов и бентоса, а также типов грунтов и трофического статуса, определенного при помощи ЭС (A, B, C, D, E, F – кластеры).

ние этих озер к мезотрофному типу. Аналогичный эффект отмечен, например, для оз. Байкала [4] – классического олиготрофного водоема с высокой первичной продукцией под 1м² поверхности, но низкой продукцией в единице объема воды. Для этих озер характерна самая низкая биомасса бентоса.

Не вдаваясь в детальное описание типичных характеристик озер каждого кластера, отметим, что они принципиально не отличаются от классификаций С.В. Герда и И.В. Баранова [3]. Различия, конечно, есть – например, понтопорейные озера С.В. Герда попадают в разные кластеры. Но это свидетель-

Таблица 2. Средние характеристики кластеров озер Карелии

Характеристика	Кластеры					
	A	B	C	D	E	F
Площадь озера, км ²	318.80	117.12	13.75	13.15	25.14	13.34
Высота над уровнем моря, м	99.95	126.31	63.38	79.09	137.17	118.86
Средняя глубина, м	9.58	6.53	8.56	6.66	3.84	3.41
Максимальная глубина, м	40.00	24.16	20.69	15.41	14.58	10.62
Прозрачность воды, м	6.2	4.6	2.5	2.5	4.3	1.5
Цветность воды, град	3.6	4.7	3.8	7.3	6.3	8.5
Термический тип, градусо-дни	1520	1650	1844	1877	1770	1890
Биомасса бентоса, кг/га	7.2	12.3	28.4	74.1	21.0	26.6
Трофический статус, балл	3.4	2.9	3.0	3.3	3.4	3.8
Озеро – центр кластера	Нижнее Куйто	Торос-озеро	Валгом-озеро	Тарасм-озеро	Вотт-озеро	Лакшгь-ярви

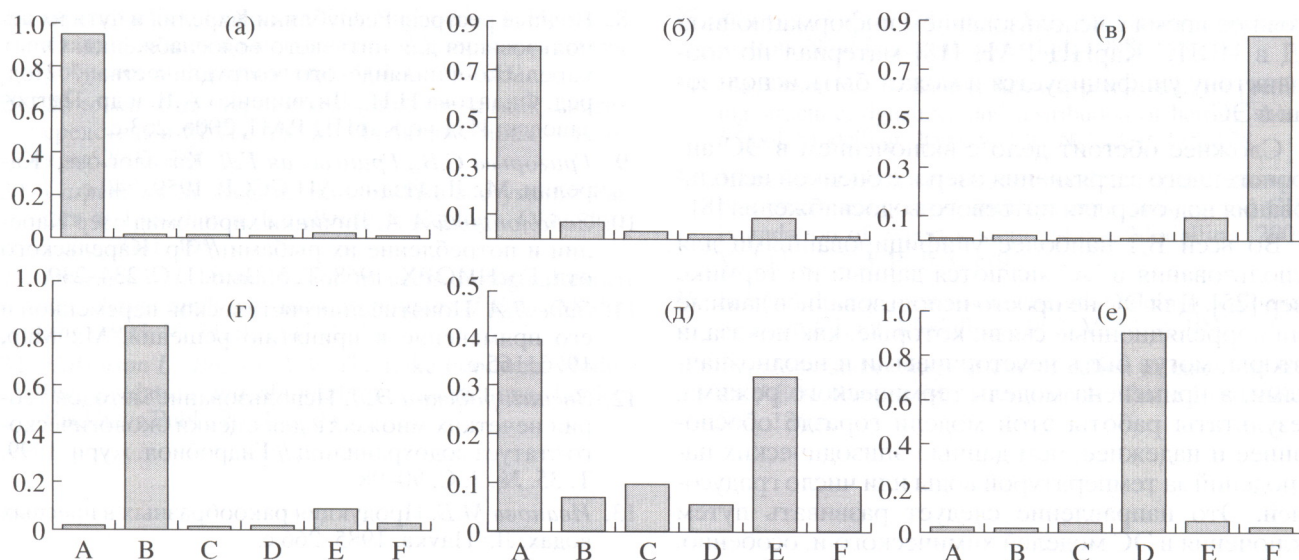


Рис. 11. Функции принадлежности некоторых озер, полученные в результате нечеткой классификации. По оси абсцисс – индексы кластеров. а – Среднее Куйто, б – Выгозеро, в – Лоймоланярви, г – Кимасозеро, д – Суоярви, е – Пелдожское.

ствует как раз о пользе применения нечеткой классификации. На рис. 11 представлены функции принадлежности некоторых озер. Если озера Среднее Куйто и Выгозеро имеют достаточно четкую принадлежность к одному определенному кластеру, то оз. Суоярви демонстрирует высокую размытость своей классификационной принадлежности. Характерно, что центром каждого кластера (наиболее типичным элементом) оказалось озеро, которое наименее изучено по сравнению с другими озерами своего кластера. Это – следствие применения ЭС для определения пропущенных характеристик озер, что, с одной стороны, свидетельствует о целесообразности применения ЭС, а с другой стороны, является стимулом для уточнения фактических данных по этим озерам. Оптимальный вариант для проведения классификации озер – изучение их по единой методике со стандартным набором измерений и исследований. Именно такой подход был предложен еще Г.Ю. Верещагиным [5, 6] для изучения озер. Конечно, в программе Г.Ю. Верещагина отсутствуют очень многие, существенные в настоящее время характеристики озер (например, продукция или промышленное загрязнение), но важен сам принцип комплексного, единообразного подхода к изучению озер.

Обсуждать вид функций принадлежности для каждого озера в рамках настоящей статьи не представляется возможным. Важно только продемонстрировать возможность и лимнологическую естественность нечеткой классификации озер. Отметим, что примеры такого подхода уже существуют [12, 28].

ВЫВОДЫ

Предлагаемая ЭС для озер Карелии работает достаточно эффективно. Система апробирована как на данных 1950-х гг., так и на современных. При этом отметим, что за последние 50 лет некоторые озера перешли в другое или находятся в пограничном трофном состоянии, ряд озер были закислены или подвержены токсическому загрязнению. С увеличением трофности озер возрастают численность бактериопланктона, биомасса зоопланктона и зообентоса и видовой состав рыб. За эти годы ряд видов рыб исчез, появились новые. К примеру, на оз. Сямозеро после 1950-х гг. исчезли угорь, пелядь, голавль, голянь, хариус, а появились новые. Связано это как с акклиматизацией, так и с рыболовной деятельностью (интенсивное разведение форели на озерах Карелии с начала XXI в. – в судах производится >70% форели России). Проведенная работа наглядно показала возможность создания ЭС и для других озерных регионов с учетом их специфики. Разработана структура такой системы и предложен математический аппарат, который, несомненно, требует развития и совершенствования.

В разработанной системе не использовались данные по зоопланктону озер. На первых этапах создания ЭС выяснилось, что сведения о зоопланктоне, приведенные в [24], обладают настолько большой степенью неопределенности, что включение их в ЭС не имело смысла. Это совершенно не означает, что характеристики зоопланктона следует вообще исключить из рассмотрения, хотя при определении наиболее информативных признаков для мониторинга экосистем озер Европы в рамках Европейской рамочной директивы этот параметр был исключен как малоинформативный [37]. В на-

стоящее время с использованием информационной БД в ИВПС КарНЦ РАН [18] материал по зоопланктону унифицируется и может быть использован в ЭС.

Сложнее обстоит дело с включением в ЭС антропогенного загрязнения озер и с оценкой использования вод озер для питьевого водоснабжения [8].

Во всей БД наиболее унифицированными для использования в ЭС являются данные по термике озер [25]. Для ЭС не просто использовались данные или корреляционные связи, которые, как показали авторы, могут быть неустойчивыми и неоднозначными, а применена модель термического режима. Результаты работы этой модели гораздо обоснованнее и надежнее, чем данные эпизодических наблюдений за температурой воды или число градусо-дней. Это направление следует развивать путем включения в ЭС моделей химического и, особенно, биотического баланса. Перспективность такого подхода показана в [32], где рассматривается универсальная модель озерной экосистемы, которая может настраиваться на немногочисленные фактические данные. Важно, что в предлагаемой нами работе использованы достижения продукционного направления [7], а также фактический материал по озерам Карелии за более чем 50-летний период.

Авторы благодарят сотрудников ИВПС КарНЦ РАН Н.М. Калинин, М.Т. Сярки, А.В. Рябинкина, М.Б. Зубкова, А.П. Георгиева, М.С. Богданову за полезное обсуждение результатов, подготовку БД и помощь при подготовке рисунков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.Л. Анализ эколого-географических данных с использованием теории нечетких множеств. Л.: Наука, 1987. 142 с.
2. Балущкина Е.В., Голубков С.М., Иванова М.Б. и др. Опыт прогнозирования последствий эвтрофирования водоемов на основе закономерностей функционирования экосистемы (на примере Лакшмозера) // Реакция озерных экосистем на изменение биотических и абиотических условий / Под ред. Алимова А.Ф., Бульона В.В. СПб.: Наука, 1997. С. 228–265.
3. Баранов И.В. Лимнологические типы озер СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 276 с.
4. Бульон В.В. Особенности первичной продукции в озерных экосистемах. СПб.: Наука, 1994. 222 с.
5. Верецагин Г.Ю. Программа предварительного исследования озера // Изв. Русского географического об-ва. 1917. Т. 53. Вып. 1. С. 215–245.
6. Верецагин Г.Ю. Программы и методы работы Олонецкой научной экспедиции в 1917–1923 годах // Тр. Олонецкой научной экспедиции. 1924. Ч. 1. Вып. 1–2. С. 21–60.
7. Винберг Г.Г. Энергетический принцип изучения трофических связей и продуктивности экологических систем // Зоол. журн. 1962. Т. 41. № 11. С. 1618–1631.
8. Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / Под ред. Филатова Н.Н., Литвиненко А.В. и др. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2006. 263 с.
9. Григорьев С.В., Грицевская Г.Л. Каталог озер Карелии. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1959. 240 с.
10. Заболотный А.А. Личинки хирономид озер Карелии и потребление их рыбами // Тр. Карельского отд. ГосНИОРХ. 1968. Т. 5. Вып. 1. С. 234–239.
11. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
12. Звенигородский Э.Л. Использование методов теории нечетких множеств для оценки экологического статуса водохранилищ // Гидробиол. журн. 1999. Т. 35. № 3. С. 90–98.
13. Иванова М.Б. Продукция ракообразных в пресных водах. Л.: Наука, 1985. 266 с.
14. Каталог озер и рек Карелии / Под ред. Филатова Н.Н., Литвиненко А.В. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2001. 290 с.
15. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
16. Китаев С.П. Ихтиомасса и рыбопродукция малых и средних озер и способы их определения. СПб.: Наука, 1994. 176 с.
17. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
18. Куликова Т.П. Зоопланктон водоемов бассейна реки Шуи (Карелия). Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2004. 122 с.
19. Левин Р., Дранг Д., Эделсон Б. Практическое введение в технологию искусственного интеллекта и экспертных систем с иллюстрациями на Бейсике. М.: Финансы и статистика, 1990. 240 с.
20. Лозовик П.А. Гидрохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию. Автореф. дис. ... докт. химич. наук. М.: ГЕОХИ РАН, 2006. 59 с.
21. Мандель И.Д. Кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1988. 176 с.
22. Мениуткин В.В., Филатов Н.Н., Потахин М.С. Экспертная система “Озера Карелии”. 1. Порядковые и номинальные характеристики озер // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36.
23. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Поспелова Д.А. М.: Наука, 1986. 312 с.
24. Озера Карелии. Природа, рыбы и рыбное хозяйство. Справочник. Петрозаводск: Госиздат КАСР, 1959. 620 с.
25. Пальшин Н.И., Ефремова Т.В. Стохастическая модель годового хода температуры поверхности воды в озерах // Метеорология и гидрология. 2005. № 3. С. 85–94.
26. Попов Э.В. Экспертные системы. М.: Наука, 1987. 284 с.
27. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам. М.: Мир, 1989. 388 с.

28. Фролова Л.Л., Королева Т.О., Закиров А.Г. Нечеткая классификация качества воды // Матер. 8 съезда гидробиологов. Калининград, 2001. С. 208–209.
29. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами МАТЛАВ. М.: Горячая Линия – Телеком, 2007. 288 с.
30. Carpenter C.R. Regime shifts in lake ecosystems: Pattern and validation. Excellence in Ecology. Oldendorf: Luhe, 2001. 199 p.
31. Droesen W.J. Formalization of ecohydrological expert knowledge applying fuzzy techniques // Ecol. Modelling. 1993. V. 74. P. 1337–1346.
32. Hakanson L., Boulion V.V. The Lake Foodweb. Modeling predation and abiotic/biotic interactions. Leiden: Backhays Publ., 2004. 260 p.
33. Klir G.J., Folger T.A. Fuzzy Sets, Uncertainty and Information. New Jarsey: Printer-Hall, 1988. 278 p.
34. Mackinson S. An adaptive fuzzy expert system for predicting structure, dynamics and distribution of herring shoals // Ecol. Modelling. 2000. V. 126. № 2–3. P. 155–178.
35. Matternicht G. Assessing temporal and spatial changes of salinity using fuzzy logic, remote sensing and GIS. Foundation of expert system // Ecol. Modelling. 2001. V. 144. № 2–3. P. 163–179.
36. Salski A. Fuzzy – knowledge based models in ecological research // Ecol. Modeling. 1992. V. 53. P. 103–112.
37. Typology and ecological classification of lakes and rivers / Eds. Ruoppa M., Karttunen K. Tema Nord 2002: 566. 136 p.