

ЛИТЕРАТУРА

Federal Environmental Agency. Water body management and restoration procedures in Germany. Umweltbundesamt & Brandenburgische Universität Cottbus. 2006.

Lake Management and Restoration in LakePromo-countries / Ruokojärvi, Arja (ed.). Joint Summary Manual. Savonia University of Applied Sciences, Series D9/2006. Kuopio. 2006.

Lake Management and Restoration Practices in Hungary / Karacsonyi, Zoltan; Magyarics, Andras; Karacsonyi, Judit; Ibranyi, Andras; Szabo, Tiinde. University of Debrecze, Centre for Environmental Management and Policy. 2006.

Lake Management and Restoration procedures in Estonia / Tuvikene, Lea; Tuvikene, Arvo; Laas, Alo; Sarik, Diana & Jarvalt, Ain. Estonian University of life Sciences, Centre for limnology. 2006.

Lake Management and Restoration procedures in LakePromo-countries / Roquetas de Mar. Information package – Spain. Roquetas de Mar, Almeria-Spain. 2006.

Management and Restoration of lakes in Denmark. The County of North Jutland / Bramm, Mette; Christensen, Inge. 2006.

Teemu, Ulvi; Lakso, Esko (toim.). Ympäristöopas 114. Järvien kunnostus. Helsinki. Suomen Ympäristökeskus. 2005.

The Lakepromo Project Information Package on Lake Management and Restoration Practices in Finland / Tiilikainen, Satu (eds.). Savonia University of Applied Sciences, Engineering Kuopio. Series D 4/2006.

Wetland Restoration and Management: United Kingdom Information Package / Diston, Dave; Mitchell, Steve. University of Brighton, School of the Environment. 2006.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ «ОЗЕРА КАРЕЛИИ»

В. В. Меншуткин*, Н. Н. Филатов**

* Санкт-Петербургский Экономико-математический институт РАН

** Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

ВВЕДЕНИЕ

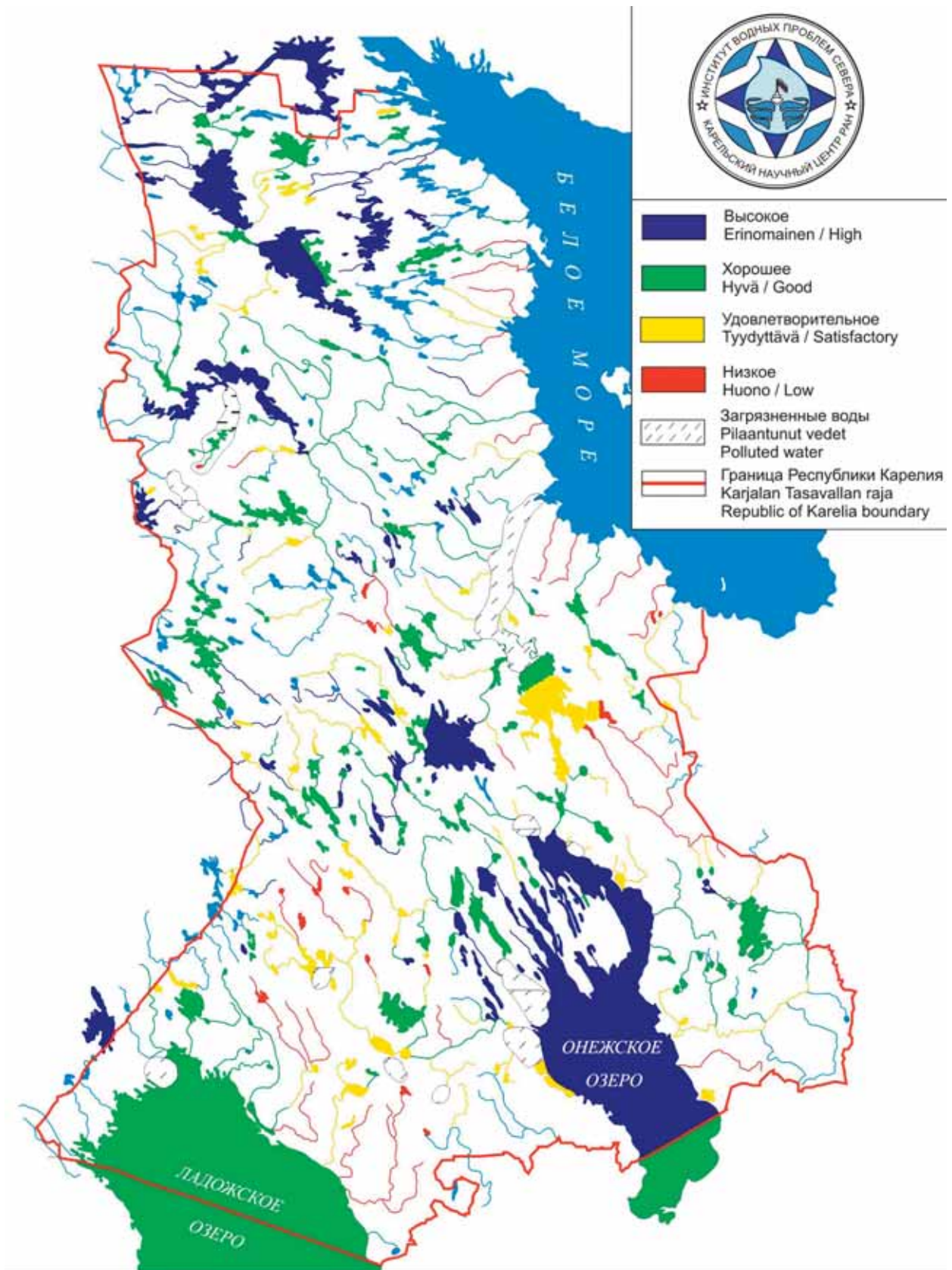
В настоящее время ресурсы многочисленных озер России оценены весьма приблизительно, так как изучено менее 1% озерного фонда, который в нашей стране насчитывает более 2 млн озер. Таким образом, в связи с отсутствием или недостатком информации о ресурсах озер, главным образом биологических, требуется разработать новые эффективные методы и средства их изучения. Для условий недостатка или отсутствия данных предлагается разработка экспертной системы (ЭС) для озер, которая создается с использованием методов искусственного интеллекта с применением математического аппарата нечеткой логики. Разработка выполнена на примере наиболее изученного в России озерного региона – Карелии (Григорьев, Грицевская, 1959; Озера Карелии..., 1959; Китаев, 1994; Литвиненко и др., 1998; Современное состояние..., 1998; Каталог озер и рек Карелии, 2001; Водные ресурсы..., 2006).

Для разработки ЭС в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН создана база данных по морфометрии, гидрологии, гидрохимии и гидробиологии для 100 наиболее изученных озер. В эту базу вошла информация по 100 озерам, ранее описанным в справочнике «Озера Карелии...» (1959). На предварительном этапе создания ЭС была выполнена классификация озер методами многомерной статисти-

ки, факторного, кластерного и логико-информационного анализа с использованием метода многомерного шкалирования (Китаев, 2007; Меншуткин и др., 2008). С использованием экспертной системы определен трофический статус этих озер, и на конечном этапе применена ЭС для классификации озер Карелии. Разработанная методика может использоваться для более корректного, чем ранее, оценивания ресурсов озера, применяться как инструмент управления для охраны и рационального использования озер и их ресурсов.

Для разработки экспертной системы были созданы базы данных (БД) за «фоновый» период, когда озера были мало подвержены антропогенному влиянию, т. е. за 1940–1960-е годы, а также за 1970–2006 гг. Таким образом можно было проследить динамику изменения озерных систем. Собранная информация систематизировалась на основе структуры знаний о предметной области, которая отображает отношения между понятиями. Для широкого круга пользователей разработана электронная информационно-справочная система о водных объектах, которая создана на основе MapObject LT и реляционной СУБД.

Классификация озер Карелии осуществлялась неоднократно многими исследователями (Герд, 1956; Китаев, 1984; Лозовик и др., 2003) (рис. 1). Все классификации основывались на выделении какого-либо одного признака или группы сходных признаков. Характерная осо-



Р и с . 1 . Карта качества воды озер Карелии

бенность ранее применявшихся подходов заключается в отсутствии конструктивного алгоритма восстановления неизвестных характеристик озера после отнесения его к определенному классу. В лучшем случае указывались очень широкие границы изменения недостающих характеристик без установления степени достоверности. При применении методов многомерного статистического, факторного анализа, когда все признаки считаются равноправными и нормируются в диапазоне от 0 до 1, озера Карелии представляют собой достаточно гомогенную систему без четкого разделения на классы. Таким образом, однозначная классификация, относящая каждое озеро к одному какому-то классу, будет в значительной мере искусственной и давать в некоторых случаях ошибочные результаты. Известно, что статистические распределения некоторых характеристик озер Карелии далеки от нормального (Меншуткин и др., 2008). Это делает применение классических методов статистического анализа не вполне надежными. В таких случаях рекомендуется обращаться к методам непараметрической статистики и использовать математический аппарат нечетких множеств и нечеткой логики (Кофман, 1982; Поспелов, 1986; Klir, Folger, 1988). Аппарат информационно-логического анализа достаточно хорошо зарекомендовал себя в ландшафтных исследованиях (Арманд, 1975).

Для оценки связей, построения эффективных моделей озерных экосистем было проведено всестороннее изучение озер, которые рассматриваются в совокупности, как единое целое, состоящее из неповторимых индивидуальностей (Меншуткин, 2005).

Все характеристики озер как сложных природных комплексов были шкалированы, так как их физические, химические и биологические характеристики разнообразны и зачастую трудно сопоставимы (Арманд, 1975). Мы использовали опыт С. П. Китаева (1984), который применял метод расширяющихся шкал с границами (L_i), определяемыми по формуле:

$$L_i = n^x, \text{ где } x = \frac{\text{Log}(L_{\max} - L_{\min})}{\text{Log}(n)}$$

Здесь L_{\max} – максимальное значение признака, L_{\min} – минимальное значение признака, n – число градаций шкалы. Для единообразия для всех характеристик озер использовались шкалы в промежутке от 1 до 7, т. е. все характеристики разбиты на 7 диапазонов (табл. 1).

Известно, что связи между разными параметрами озер могут иметь нелинейный характер и применение линейных регрессионных моделей для их описания нецелесообразно. И поэтому вводят специальные коэффициенты, опыт использования которых имеется в социологии и медицине (Стивенс, 1960; Аптон, 1982). Сущность этих коэффициентов заключается в уточнении оценки шкалированной характеристики.

На рис. 2 представлены результаты применения многомерного шкалирования к порядковым характеристикам озер Карелии. Центральное место занимают максимальные и средние глубины озера как наиболее обобщающие и информативные характеристики. Близка к ним по значимости площадь озера (S). Важными являются такие параметры, как типы грунтов, термические свойства озера, цветность воды и биомасса бентоса.

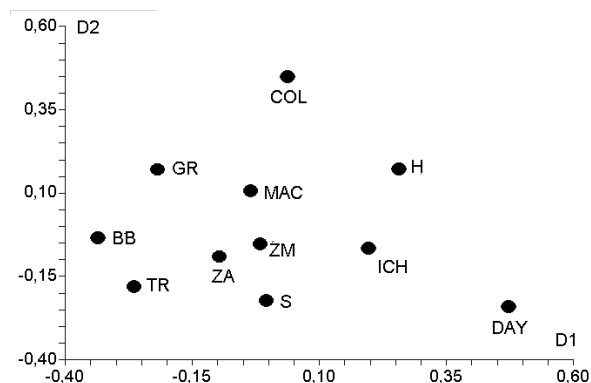
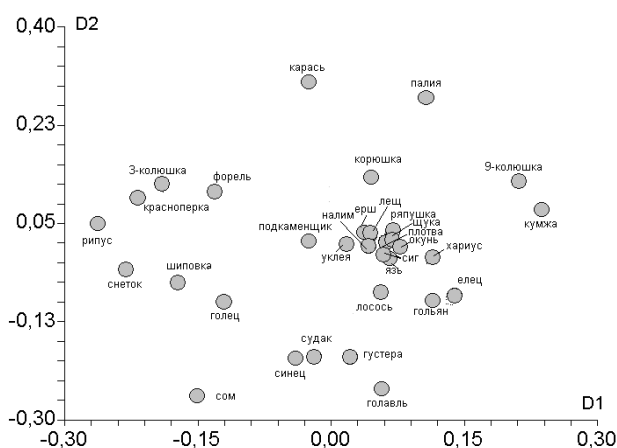


Рис. 2. Расположение порядковых характеристик 100 озер Карелии в координатах D1 и D2 при многомерном шкалировании. Расстояния между характеристиками вычислялись по формуле в тексте. Обозначения, как в табл. 1

Таблица 1
ШКАЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЕР

Характеристика озера		Градации шкалы						
		1	2	3	4	5	6	7
S	Площадь озера (км ²)	2	10	40	110	240	740	1200
H	Высота озера над уровнем моря (м)	36	46	60	82	110	150	190
ZA	Средняя глубина озера (м)	1,5	2,8	5,1	7,9	14,0	18,0	22,0
ZM	Максимальная глубина озера (м)	2,0	4,5	11,0	20,0	34,0	70,0	95,0
TR	Прозрачность воды по диску Секки (м)	1	2	3	4	5	6	7
COL	Цветность воды (по шкале Фореля – Уле)	1	2	3	5	6	8	10
BB	Биомасса бентоса (г/м ²)	0	5	14	30	50	100	160
MAC	Число видов макрофитов	0	2	3	5	6	8	10
ICH	Число видов рыб в икhtiоценозе озера	0	4	7	10	13	16	20
DAY	Число градусо-дней	1200	1260	1300	1400	1500	1700	2000

При этом отметим, что ряд характеристик озер носит не количественный, а качественный характер. Такие признаки называются номинальными в отличие от порядковых. К номинальным относятся типы грунтов, списки видов макрофитов, зоопланктона, бентоса и рыб. Эти характеристики носят двоичный характер, например, в данном озере обитает ряпушка ($a_{\text{ряпушка}} = 1$) или в данном озере ряпушки нет ($a_{\text{ряпушка}} = 0$). Важным является то, что, как показал опыт, в каждом ихтиоценозе существует ядро и так называемая периферия, и при конкретном наборе видов рыб в озере не могут появиться другие (Жаков, 1984). Для наглядности строят матрицы совместной встречаемости видов рыб в озерах. Например, при наличии в определенном озере Карелии ряпушки, лосося и сига в нем не должны появляться сом, карась, колюшка. Результаты хорошо иллюстрируются рис. 3.



Р и с . 3 . Расположение видов рыб 100 озер Карелии в координатах D1 и D2 при многомерном шкалировании. Расстояние между двумя видами определялось по формуле в тексте

По имеющейся базе данных доказано, что на видовой состав рыб в озере оказывает влияние состав бентоса и типов грунтов, а макрофиты оказывают меньшее влияние.

Для изучения связей между порядковыми и номинальными характеристиками озер Карелии применялись методы информационно-логического анализа, которые достаточно широко использовались ранее в географических исследованиях (Пузаченко, Мошкин, 1969; Арманд, 1975). Существо метода заключается в сравнении энтропии распределения некоторой природной характеристики при отсутствии какой-либо информации об объекте исследования с энтропией той же характеристики, когда имеется дополнительная информация. Первая энтропия называется априорной, а вторая – апостериорной. Энтропия (H) вычисляется по известной формуле Шеннона (см.: Китаев, 2007).

$$H_A = - \sum p(a_i) \log_2(p(a_i)),$$

где $p(a_i)$ – частота появления признака A градации i .

Далее была изучена информационная значимость различных типов грунта при разной цветности воды в озере. Например, если в озере отмечена руда или серо-зеленый ил, то это практически никак не скажется на оценке цветности воды. Наоборот, обнаружение в озере грунта типа *грубой гитии* существенно изменяет наше представление о цветности воды.

Как оказалось, констатация каменистого грунта практически никак не отражает число видов макрофитов, но может дать некоторое представление о средней глубине озера и его термическом режиме. Естественно, информационные связи нельзя путать с причинно-следственными зависимостями. Разумнее предположить, что существуют некоторые другие факторы, не отраженные в базе данных, например, это может быть особенность геологического строения района расположения озера.

Очень резкие различия в информационной значимости отмечаются у рыб. Так, обнаружение в озере окуня имеет практически нулевую информационную значимость. Это легко объясняется почти повсеместным распространением этого вида рыб в разнообразных озерах Карелии. Иное дело снеток или форель – их появление в озере позволяет судить о многих других характеристиках. Сходная картина наблюдается и для макрофитов. Такие широко распространенные виды, как камыш и тростник, несут очень мало информации, в то время как более редкие виды макрофитов (стреловидный или водная гречиха) обладают высокой информационной значимостью.

Переходя к главному вопросу – созданию самой экспертной системы, которая дает возможность определить одни характеристики озера, если известны какие-либо другие, например, по площади озера оценить возможный состав ихтиофауны или биомассу бентоса, целесообразно представить характеристики озера в виде нечетких множеств, а для определения одних характеристик озера по другим применить аппарат нечеткой логики (Кофман, 1982; Поспелов, 1986; Klir, Folger, 1988). В последние годы в географии накоплен небольшой опыт применения аппарата нечетких множеств и нечеткой логики (Salski, 1992; Drogen, 1993; Mackinson, 2000; Matternicht, 2001). Если об озере неизвестно 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. 4.

Определение функции принадлежности неизвестной характеристики озера (μ_c) по дан-

ным 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) по Заде (см.: Штовба, 2003):

$$\mu_C(i) = \text{Max}_{i \in N}^* \text{Min}(\mu_A(j), \mu_{AC}(j, i))$$

Здесь N – множество всех интервалов шкалирования.

Переходя к описанию номинальных признаков озер, отметим, что по терминологии, принятой в теории нечетких множеств, они соответствуют лингвистическим переменным (Заде, 1976). 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 есть *элодея* или в данном озере нет *элодеи*), 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 при-

надлежности 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. Именно таким случаям соответствуют дробные значения функции принадлежности. Очень важно понятие функции принадлежности при попытках прогноза или реконструкции списков видового состава. Заметим, что значение функции принадлежности 0,5 соответствует полной неопределенности в оценке данного признака.

В разработанной нами для озер Карелии ЭС фигурируют 94 лингвистические переменные, функции принадлежности которых отображаются на интерфейсе ЭС. Если об озере ничего неизвестно, кроме того, что это озеро расположено в Карелии и его площадь больше 50 га, то функции принадлежности окуня, щуки и плотвы близки к 1, а функция принадлежности карася близка к нулю. А вот для уклейки 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. Обнаружение в

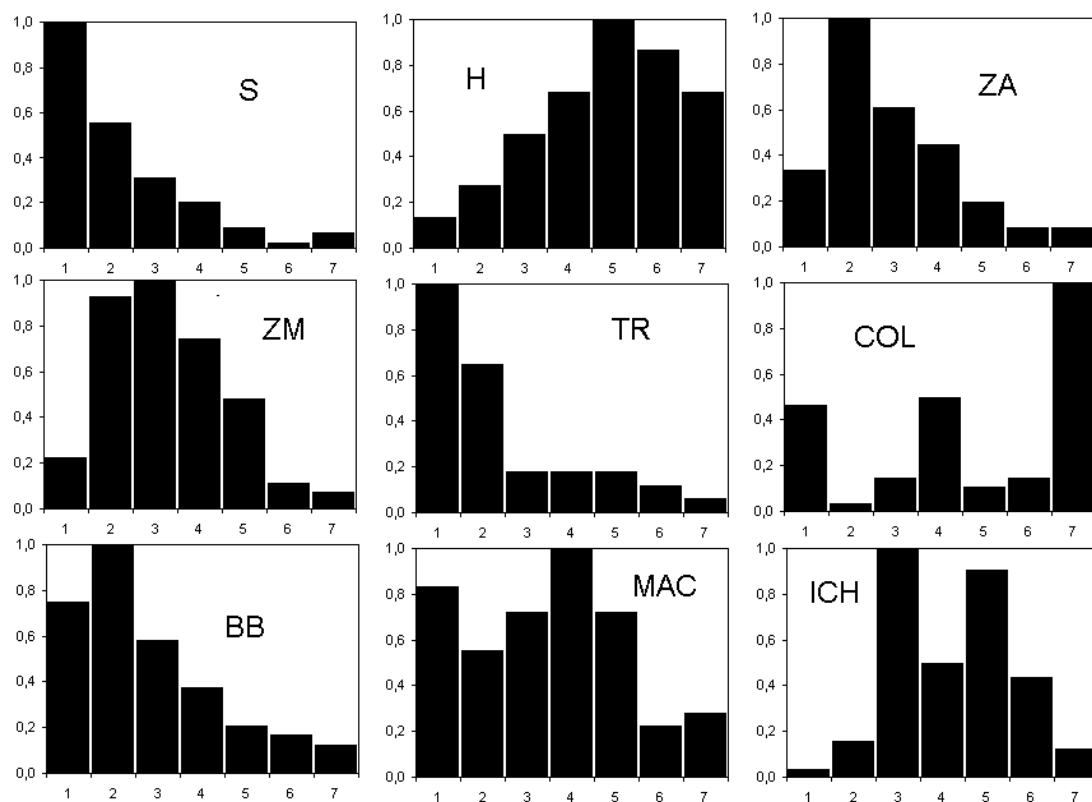


Рис. 4. Функции принадлежности характеристик озер Карелии при отсутствии информации обо всех прочих характеристиках (обозначения, как в табл. 1). По оси абсцисс – класс по шкале (табл. 1), по оси ординат – функция принадлежности

озере лососья 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, является одной из фундаментальных проблем лимнологии. Имеется несколько подходов. В настоящей работе принята классификация С. П. Китаева (1984). Однако оказалось, что для озер Карелии для корректной оценки трофности недостаточно знания таких величин, как первичная продукция фитопланктона или концентрация хлорофилла *a*. 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 вели-

чины. Поэтому необходимо придать экспертной системе свойства так называемого приобретенного знания. Иными словами, предлагается на основании относительно небольшого числа измерений первичной продукции фитопланктона установить связи этой характеристики с другими характеристиками озер, которые уже есть в базе знаний ЭС. Пример определения трофического статуса озер Карелии на основе традиционного подхода оценки продукции фитопланктона, но с использованием модели, разработанной L. Nakanson & V. Bouillon (2004), приведен на рис. На основе модели рассчитана продукция фитопланктона для 81 озера, по которым имелись все входные параметры. Трофический статус изученных озер варьирует от α -олиготрофного до α -эвтрофного. Расположение озер разной трофности на карте Карелии представлено на рис. 5.

Далее на основе так называемого приобретенного знания выполнены расчеты на ЭС. Интерфейс экспертной системы, отображающий процесс оценки трофического статуса озера, представлен на рис. 6. База знаний системы рас-

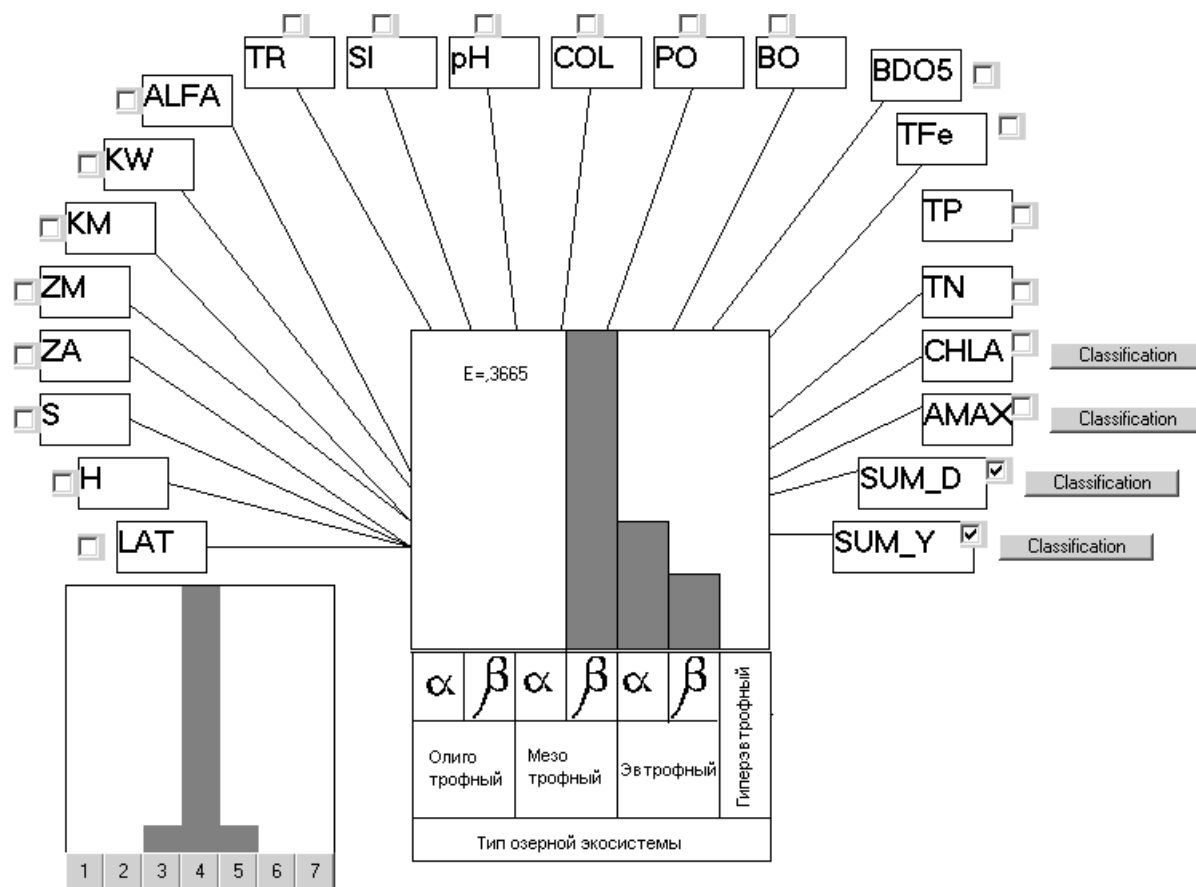
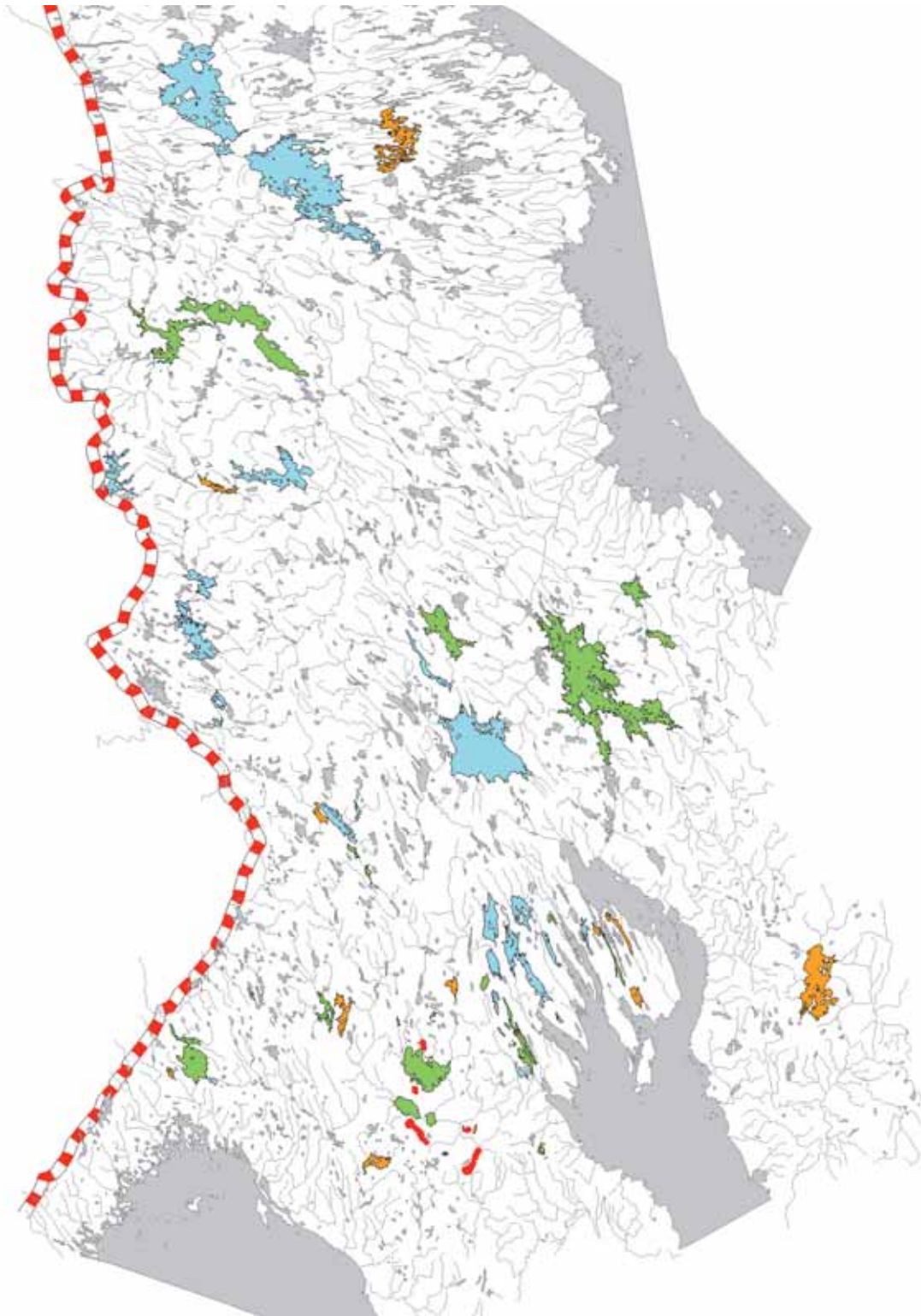


Рис. 6. Интерфейс экспертной системы (окно определения трофического статуса озера). Обозначения даны в табл. 1 и в тексте. Клавиши 1–7 и окно отображения функции принадлежности в левой части интерфейса служат для ввода исходных данных. Флажки у каждой переменной служат для включения данной переменной в процесс определения трофического статуса озера. Клавиши “Classification” предназначены для выбора характеристики, по которой производится оценка трофического статуса



Р и с . 5 . Пример классификации озер по уровню трофии, с использованием модели (Nakanson, Boulion, 2004). Расположение на карте Карелии озер, относящихся к разным классам трофности: олиготрофные – голубой, α -мезотрофные – зеленый, β -мезотрофные – желтый, α -эвтрофные – красный цвет. Расчеты выполнены в лаборатории Гидробиологии ИВПС КарНЦ РАН под руководством Н. М. Калинкиной

ширена за счет добавления сведений о показателе развития береговой линии (KM), коэффициенте условного водообмена (KW), показателе относительной глубины (ALFA), сумме неорганических ионов SI, биологическом потреблении кислорода (BDO5), максимальной продукции фитопланктона (AMAX), суммарной суточной первичной продукции (SUM_D), суммарной годовой первичной продукции (SUM_Y), концентрациях водородных ионов (pH), органического вещества в воде (BO), общего железа (TFe), общего фосфора (TP), общего азота (TN), хлорофилла *a* (CHLA). Все эти данные были шкалированы.

Оказалось, что для многих озер оценки трофности были нечеткими. Так, для озера Среднее Куйто получались оценки от α -олиготрофного до гиперэвтрофного. Функция принадлежности трофического статуса озера Долгая Ламба имеет полимодальный вид, хотя это единственный случай для всех 100 исследованных озер. Мы показали, что ряд озер имеют «размытую» оценку трофического статуса. Выяснилось, что имеет место так называемое «проклятие» неоднозначности оценки, отмеченное С. R. Carpenter (2001) на примере американских озер. Таким образом, даже современными методами искусственного интеллекта не всегда удается преодолеть трудности оценки.

Далее, когда было выполнено оценивание трофического статуса всех озер, была проведена их классификация с использованием метода многомерного шкалирования. Первичная матрица расстояний между озерами в многомерном пространстве их характеристик

строилась с учетом всех имеющихся у нас данных, а также полученных дополнительно в результате применения экспертной системы. Классификация, проведенная методом K-средних, обладала теми же недостатками, что и классификация при помощи дендрограмм. Однозначное отнесение каждого озера к одному какому-то кластеру приводило к неустойчивой классификации, при которой небольшое изменение параметров означало различные разбиения множества озер на кластеры. Чтобы избежать этих недостатков, применяем метод нечеткой классификации (Андреев, 1987; Мандель, 1988). Сущность простейшего алгоритма нечеткой классификации заключается в отыскании таких значений функции принадлежности каждого озера (*i*) к каждому кластеру (*k*) μ_{ik} , которое минимизировало бы функционал:

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

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

На основе этого подхода озера Карелии были классифицированы более корректно с использованием примененных информационных средств (рис. 7).

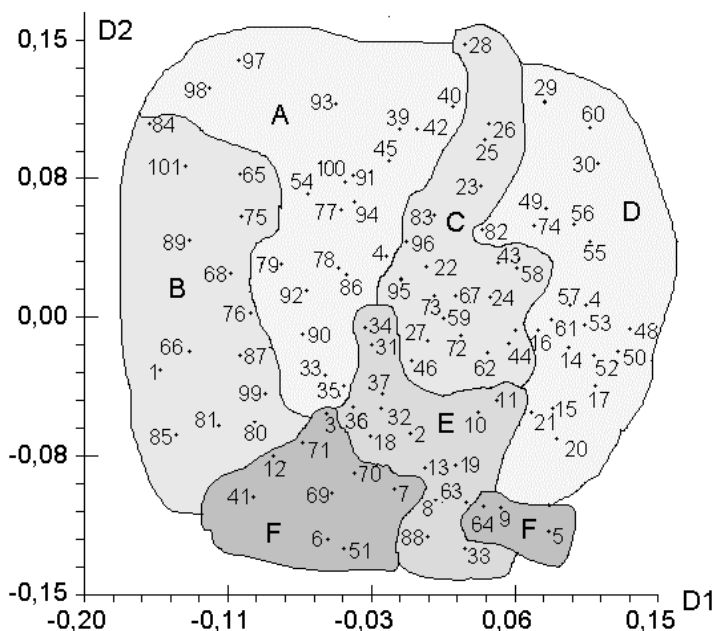


Рис. 7. Расположение 100 озер Карелии в координатах D1 и D2 с использованием 10 порядковых характеристик и списков видов рыб, макрофитов и бентоса, а также типов грунтов и трофического статуса, определенного при помощи экспертной системы. А, В, С, D, E, F – кластеры

Таблица 2

СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛАСТЕРОВ ОЗЕР КАРЕЛИИ

Характеристика	Размерность	Кластер					
		A	B	C	D	E	F
Площадь	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	м	6,2	4,6	2,5	2,5	4,3	1,5
Цветность	балл	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		Н. Куйто	Торосозеро	Валгомозеро	Тарасмозеро	Воттозеро	Лакшъярви

Качество классификации определяется при помощи коэффициента S , который представляет собой соотношение среднего расстояния озера с другими озерами внутри своего кластера (a) и среднего расстояния данного озера к озерам ближайшего кластера (b):

$$S = 1 - \frac{a}{b}.$$

Высокая гомогенность и отсутствие резких переходов от озера к озеру, возможно, является отличительной чертой озер Карелии. С этим связан разнородность и противоречивость классификационных схем, о которых говорилось в начале статьи. Наиболее типичным представителем каждого кластера считается то озеро, которое имеет минимальную размытость функции принадлежности. Например, первый кластер (А) объединяет большие олиготрофные озера севера Карелии (Топозеро, Пяозеро) (табл. 2). Ожидаемого низкого класса трофности в этих озерах экспертная система не отметила, очевидно, в силу высокой прозрачности воды и, следовательно, большой мощности фотического слоя. Поскольку в данном примере трофность оценивается по годовой первичной продукции под квадратным метром поверхности озера, то становится понятным отнесение этих озер к мезотрофному типу. Отметим, что примеры такого подхода уже существуют (Звенигородский, 1999; Фролова и др., 2001).

Не вдаваясь в детальное описание типичных характеристик озер каждого кластера, отметим, что они принципиально не отличаются от ранее проведенных классификаций С. В. Герда и С. П. Китаева. Но новый метод дает более определенное четкое отнесение к классу, что свидетельствует в пользу применения нечеткой классификации. Характерно, что центром каждого кластера (наиболее типичным элемен-

том) оказалось озеро, которое наименее изучено по отношению к другим озерам своего кластера. С одной стороны, это свидетельствует о целесообразности применения экспертной системы, но, с другой стороны, является стимулом для уточнения фактических данных по этим озерам и дает направление планирования дальнейших экспериментов. Оптимальный вариант для проведения классификации озер – это изучение их по единой методике со стандартным набором измерений и методов исследований.

Поскольку настоящая работа носит методический характер, то приводить и обсуждать вид функций принадлежности для каждого озера не представляется целесообразным. Важно только продемонстрировать возможность и лимнологическую естественность нечеткой классификации озер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспертная система, предложенная для озер Карелии, пригодна в настоящее время для этого региона. Требуется ее дальнейшее совершенствование с использованием новых данных, собранных в последние годы. Доказано, что успех или неуспех создания экспертной системы определяется, в первую очередь, качеством и организацией базы знаний (Уотермен, 1989). Это соображение в полной мере относится к проблеме создания экспертной системы по озерам Карелии. Проведенная работа наглядно показала возможность создания такой системы и для других озерных регионов. Нами разработана структура такой системы и предложен математический аппарат, который, несомненно, требует развития и совершенствования.

ЛИТЕРАТУРА

Андреев В. Л. Анализ эколого-географических данных с использованием теории нечетких множеств. Л.: Наука, 1987. 142 с.

Арманд А. Д. Информационные модели природных комплексов. М.: Наука, 1975. 126 с.

Арманд Д. Л. Наука о ландшафте (основы теории и логико-математические модели). М.: Мысль, 1975. 288 с.

Балушкина Е. В., Голубков С. М., Иванова М. Б. и др. Опыт прогнозирования последствий эвтрофирования водоемов на основе закономерностей функционирования экосистемы (на примере Лакшмозера)

// Алимов А. Ф., Бульон А. А. (ред.). Реакция озерных экосистем на изменение биотических и абиотических условий. СПб.: Наука, 1997. С. 228–265.

Баранов И. В. Лимнологические типы озер СССР. М.: Гидрометеоиздат, 1961. 276 с.

Верещагин Г. Ю. Программы и методы работы Олонецкой научной экспедиции в 1917–1923 годах // Труды Олонецкой научной экспедиции. 1924. Ч. 1, вып. 1–2. С. 21–60.

Винберг Г. Г. Энергетический принцип изучения трофических связей и продуктивности экологических систем // Зоол. журн. 1962. Т. 41, № 11. С. 1618–1631.

Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / Ред. Н. Н. Филатов и др. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 263 с.

Герд С. В. Опыт биологического районирования озер Карелии // Труды Карельского филиала АН СССР. 1956. Т. 5.

Гидроэкологические проблемы Карелии и использование водных ресурсов / Под ред. Н. Н. Филатова, В. Х. Лифшица, Т. И. Регеранд, Ю. В. Карпечко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. 171 с.

Григорьев С. В., Грицевская Г. Л. Каталог озер Карелии. М.: Л., 1959. 240 с.

Жаков Л. А. Формирование и структура рыбного населения озер Северо-Запада СССР. М.: Наука, 1984. 144 с.

Заболотский А. А. Личинки хирономид озер Карелии и потребление их рыбами // Труды Карельского отд. ГосНИОРХ. 1968. Т. 5, вып. 1. С. 234–239.

Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию решений. М.: Мир, 1976. 165 с.

Звенигородский Э. Л. Использование методов теории нечетких множеств для оценки экологического статуса водохранилищ // Гидробиол. журн. Киев, 1999. Т. 35, № 3. С. 90–98.

Каталог озер и рек Карелии / Под ред. Н. Н. Филатова и А. В. Литвиненко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.

Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер различных природных зон. Л.: Наука, 1984. 206 с.

Китаев С. П. Ихтиомасса и рыбопродукция малых и средних озер и способы их определения. СПб.: Наука, 1994. 176 с.

Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.

Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.

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.

Литвиненко А. В., Филатов Н. Н., Лозовик П. А., Карпечко В. А. Региональная экология: эколого-экономические основы рационального использования водных ресурсов Карелии // Инженерная экология. 1998. № 6. С. 3–13.

Лозовик П. А., Куликова Т. П., Мартынова Н. Н. Мониторинг водных объектов Республики Карелия // Гидроэкологические проблемы Карелии и исполь-

зование водных ресурсов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 135–144.

Меншуткин В. В. Оптимальное управление экологической системой озера или водохранилища с целью получения наибольшей экономической выгоды от эксплуатации природных ресурсов водоема. СПб.: СПб Экономико-математический ин-т, 2005. 76 с.

Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., Потахин М. С. Экспертная система «Озера Карелии» // Водные ресурсы. 2008. В печати.

Озера Карелии: Природа, рыбы и рыбное хозяйство. Справочник. Петрозаводск, 1959. 620 с.

Плюта В. Сравнительный многомерный анализ в экономических исследованиях. М.: Статистика, 1980. 151 с.

Попов Э. В. Экспертные системы. М.: Наука, 1987. 284 с.

Поспелов Д. А. (ред.). Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Наука, 1986. 312 с.

Пузаченко Ю. Г., Мошкин А. В. Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях // Медицинская география. М., 1969. Вып. 3.

Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. / Отв. ред. Н. Н. Филатов, Т. П. Куликова, П. А. Лозовик. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. 188 с.

Сорокин И. Н. Морфологические, морфометрические и гидрологические показатели и их роль в комплексной классификации озер и районировании // Теоретические вопросы классификации озер. СПб.: Наука, 1993. С. 24–35.

Стивенс С. Экспериментальная социология. Т. 1. М.: Прогресс, 1960.

Теоретические вопросы классификации озер. СПб.: Наука, 1993.

Уотермен Д. Руководство по экспертным системам. М.: Мир, 1989. 388 с.

Филатов Н. Н., Литвиненко А. В., Лозовик П. А. Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. 30 с.

Фролова Л. Л., Королева Т. О., Закиров А. Г. Нечеткая классификация качества воды // Материалы 8-го съезда гидробиологов. Калининград, 2001. С. 208–209.

Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. М.: Финансы и Статистика, 1988. 264 с.

Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая Линия – Телеком, 2007. 288 с.

Carpenter C. R. Regime shifts in lake ecosystems: Pattern and validation. Excellence in Ecology. Oldendorf Luhe. 2001. 199 p.

Droesen W. J. Formalization of ecohydrological expert knowledge applying fuzzy techniques // Ecological Modelling. 1993. V. 74. P. 1337–1346.

Hakanson L., Boulion V. V. The Lake Foodweb. Modelling predation and abiotic/biotic interactions. Backhays Publ. Leiden. 2004. 260 p.

Klir G. J., Folger T. A. Fuzzy Sets, Uncertainty and Information. Printer-Hall. 1988. 278 p.

Mackinson S. An adaptive fuzzy expert system for predicting structure, dynamics and distribution of herring shoals // *Ecological Modelling*. 2000. V. 126 (2–3). P. 155–178.

Matternicht G. Assessing temporal and spatial changes of salinity using fuzzy logic, remote sensing and GIS. Foundation of expert system // *Ecological Modelling*. 2001. V. 144 (2–3). P. 163–179.

Raspopov I. M., Menshutkin V. V., Docenko O. N. Aquatic vegetation dynamics during 20 years in two bays of Ladoga Lake // *Archiv Hydrobiol. Beih. Stuttgart*, 1988. V. 27. P. 75–82.

Topology and ecological classification of lakes and rivers. Ed. M. Ruoppa and K. Karttunen. Tema Nord 2002: 566. 136 p.

Salski A. Fuzzy – knowledge based models in ecological research // *Ecological Modelling*. 1992. V. 53. P. 103–112.

«БИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ» ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Т. Н. Полякова

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

Вселение новых видов в экологические системы – широко распространенный естественный процесс, происходивший во все геологические эпохи существования жизни. Однако благодаря глобализации хозяйственной деятельности человека он особенно интенсивно протекает в современный период. В последние десятилетия резко возросли темпы вселения чужеродных организмов (биологическая инвазия) в водные экосистемы. Основными причинами этого являются интенсификация судоходства и нерегулируемый сброс балластных вод судами. Вселение чужеродных видов негативно влияет на биологическое разнообразие, структуру и функционирование водных экосистем, а патогенные организмы и токсические виды водорослей представляют собой прямую угрозу здоровью человека.

Актуальность этой проблемы в России обусловлена существованием многочисленных гидросооружений, широкой сетью водных коммуникаций, большими внутренними водоемами. Все это способствует более свободному обмену фауной и флорой между различными, прежде изолированными водными системами.

В настоящее время чужеродные виды считаются второй по значению угрозой биоразнообразию (после разрушения мест обитания). Вселение чужеродных видов животных, растений и микроорганизмов в природные сообщества в результате деятельности человека (интродукции) представляет собой «биологическое загрязнение» (Колонин и др., 1992; Ижевский, 1995). Последствия биологического загрязнения, в отличие от других видов антропогенного воздействия (например, нефтяного загрязнения), имеют, как правило, необратимый характер. «Биологическое загрязнение» сравнимо по своим последствиям с другими видами загрязнения, а в ряде случаев ущерб окружающей среде от видов-вселенцев значительно превышает от-

рицательные последствия от действия всех других антропогенных факторов. Кроме того, в отличие от большинства загрязняющих веществ, которые в экосистемах обычно трансформируются в ходе процессов самоочищения и поддаются контролю со стороны человека, непредсказуемость и практическая неустранимость «биологического загрязнения» делает его специфической и весьма мощной формой антропогенного воздействия. Это явление приобрело глобальный характер, а инвазии чужеродных организмов признаны одним из ведущих факторов трансформации природных экосистем (Биологические инвазии..., 2004).

В 1992 г. в Рио-де-Жанейро была подписана международная Конвенция о биологическом разнообразии (КБР). Через несколько лет в США и России были приняты свои законы о контроле над распространением вселенцев, а в 2002 г. в Гааге были утверждены «Руководящие принципы по предотвращению интродукций и уменьшению воздействий чужеродных видов», согласно которым правительства всех стран обязаны остановить распространение опасных видов.

Подробная информация о международном законодательстве и международном сотрудничестве по проблеме интродукций чужеродных видов содержится в подготовленном Всемирным Союзом Охраны Природы (IUCN) специальном обзоре, а также на тематических сайтах в Интернет (Региональный центр по биологическим инвазиям, 2001; GloBallast, 2000).

По терминологии, принятой в рамках КБР, *чужеродным видом* живого организма для природного сообщества считается вид, подвид или таксон низшего ранга, интродуцированный за пределы его природного распространения (прошлого или настоящего ареала), включая любую часть, гаметы, семена, яйца или жизненные стадии таких видов, которые могут выживать и размножаться.