



<http://ecopri.ru>

<http://petsu.ru>

Издатель

ФГБОУ «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

Т. 1. № 1(1). Март, 2012

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. К. Зильбер
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов

Редакционная коллегия

Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. Е. Веселов
Т. О. Волкова
В. А. Илюха
Н. М. Калинин
А. М. Макаров
А. Ю. Мейгал

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
А. А. Кухарская
О. В. Обарчук
Н. Д. Чернышева
Т. В. Климюк
А. Б. Соболева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Красноармейская, 31. Каб. 343.

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>



УДК 574.58:556.55

Реконструкция гидробиологических данных для озер Карелии

КАЛИНКИНА
Наталья Михайловна

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
kalina@nwpi.krc.karelia.ru*

Ключевые слова:

озера Карелии
классификация
гидробиологические показатели
гидрохимические показатели
таблицы сопряженности
прогноз

Аннотация:

Рассматриваются факторы изменчивости гидрохимических и гидробиологических показателей водоемов Карелии (выборка включала 225 озер). Показано, что среди них преобладают олиго-мезотрофные водоемы, в то время как доля эвтрофных озер весьма мала (около 10%). С использованием регрессионного анализа не удалось выполнить точный прогноз биомассы фитопланктона и зоопланктона по концентрации общего фосфора в воде, что связано с высокой изменчивостью показателей. Разработаны гидрохимический и гидробиологический индексы, по величине которых выполнена классификация озер Карелии. На основе анализа таблиц сопряженности между индексами разработан метод прогноза биомассы зоопланктона (с точностью 55–86%) и биомассы зообентоса (с точностью 71–78%) по концентрации общего фосфора в воде озер.

© 2012 Петрозаводский государственный университет

Получена: 13 декабря 2011 года

Опубликована: 25 ноября 2013 года

Введение

Одной из важнейших задач гидроэкологии является оценка биоресурсного потенциала водоемов. Сложность решения этой задачи обусловлена динамикой состояния водных экосистем, их гетерогенностью, невозможностью охватить исследованиями весь водный объект. Недостаток информации о биологических ресурсах озер приводит к необходимости их реконструкции с использованием экспертных информационных систем (Розенберг и др., 2005; Меншуткин и др., 2009б; Меншуткин, 2010). В настоящей работе задача реконструкции биологических данных решается для озер Карелии с применением методов информационного анализа данных (Арманд, 1975; Шитиков и др., 2005а). Воспроизведение недостающих данных по имеющимся показателям возможно при условии существования между ними связей. Сложность реконструкции связана с изменчивостью гидроэкологических показателей, которая определяет силу связей между компонентами экосистемы. Для увеличения точности реконструкции необходимо рассмотреть причины изменчивости показателей и выбрать адекватные методы количественного описания связей. Цель настоящих исследований – выполнить реконструкцию недостающих гидробиологических данных по гидрохимическим характеристикам озер Карелии. Задачи исследований: 1). Рассмотреть амплитуду изменчивости признаков (содержание общего фосфора, общего азота, взвешенных веществ, хлорофилла «а», биомасса фитопланктона, зоопланктона и зообентоса) и изучить законы их распределения. 2). Рассчитать индексы комплексной оценки состояния абиотической и биотической компонент экосистемы, выполнить классификацию озер по индексам. 3). Оценить сопряженную изменчивость индексов. 4). Выполнить оценку точности прогноза гидробиологических показателей по гидрохимическим параметрам.

Материалы

В основу данной работы был положен массив данных из архива Института водных проблем Севера КарНЦ РАН по 225 озерам Карелии, который включал гидрохимические (содержание общего фосфора, общего азота, взвешенных веществ, хлорофилла «а») и гидробиологические показатели (данные по биомассе фитопланктона, зоопланктона и зообентоса). Материалы были собраны в 1960–2008 гг. Приведенные величины гидрохимических показателей получены при усреднении данных за сезон. Гидробиологические данные были собраны в основном в июле-августе.

Методы

При математической обработке данных использовали методы многомерной статистики: корреляционный, регрессионный, кластерный, компонентный, дискриминантный анализ, а также непараметрические критерии – коэффициент ранговой корреляции Спирмена (Ивантер, Коросов, 2003; Пузаченко, 2004; Шитиков и др., 2005а).

Результаты

Принципы классификации озер

На первом этапе статистического анализа данных необходимо было рассмотреть структуру гидрохимических и гидробиологических показателей и оценить характер их распределения. Оказалось, что изучаемая выборка озер Карелии ($n = 225$) характеризуется выраженной асимметрией: среди озер преобладающими оказались слабо- или среднепродуктивные, в то время как эвтрофные водоемы были представлены весьма слабо. По классификации С. П. Китаева (2007), исходя из данных по содержанию общего фосфора, 89% озер являются олиго- или мезотрофными, 11% – эвтрофными. По величине биомассы фитопланктона ($n = 44$), бентоса ($n = 178$) и зоопланктона ($n = 171$) практически все изученные озера (95–100%) относятся к олиго- или мезотрофному классу.

Большая представленность олиго- и мезотрофных озер в выборке отразилась на характере распределения изучаемых показателей. Гидрохимические и гидробиологические показатели характеризуются ярко выраженной правосторонней асимметрией распределения. На рис. 1 представлено распределение исходных значений концентрации фосфора общего.

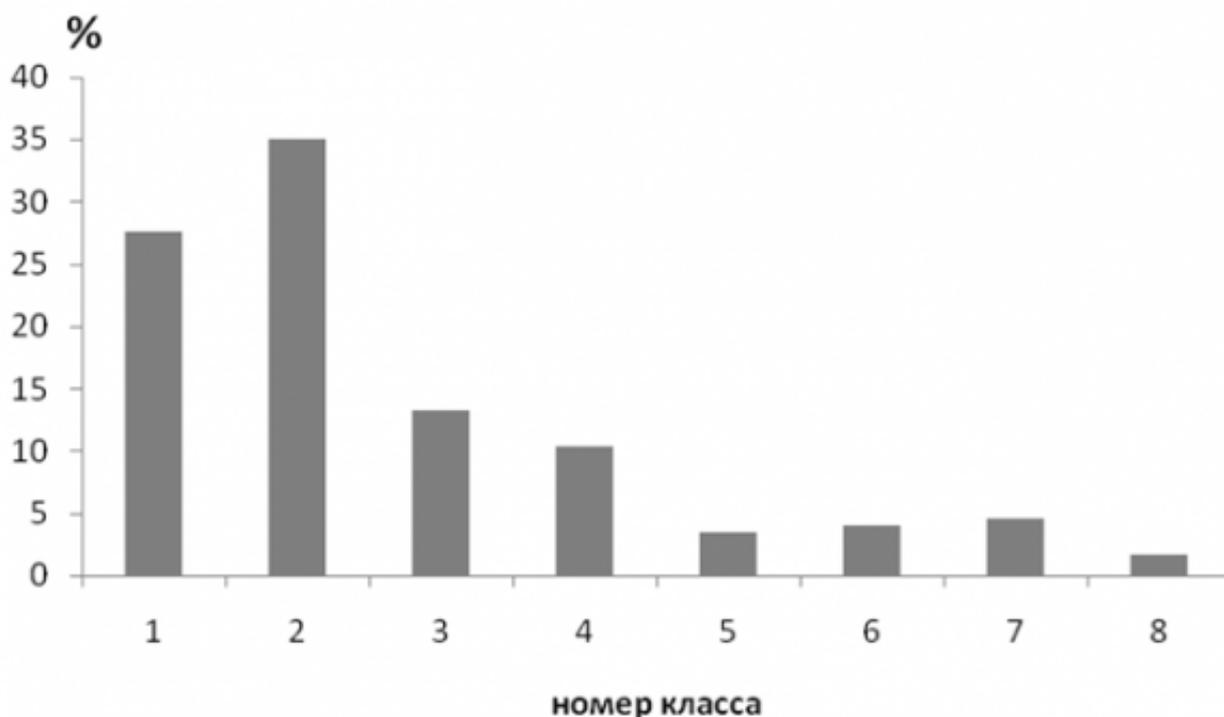


Рис. 1. Распределение исходных значений концентрации фосфора общего
Fig. 1. The distribution of initial data on the total phosphorous concentrations

Наибольшую долю в изучаемой выборке имеют классы с наименьшими значениями признаков, которые формируют, так называемое, «ядро распределения». Оно отражает фоновые характеристики изучаемой выборки озер Карелии (относительно слабую их продуктивность), определяемые действием глобальных факторов – климатического и геологического. В то же время наличие правостороннего «хвоста» распределения (наличие систематически встречающихся повышенных значений показателей) отражает действие антропогенного фактора на некоторые озера, которые отличаются заметно более высокими показателями трофности. В список этих озер входят такие как, например, Миккельское, Крошнозеро, Выгозеро, Ругозеро, Пряжинское, Сямозеро и некоторые другие, водосборы которых подвержены действию сельского хозяйства.

Логарифмирование показателей приводило их распределение к нормальному. На рис. 2 для примера приведено распределение логарифмированных значений концентрации фосфора общего, подчиняющееся нормальному закону ($\chi^2 = 3.96$, $p = 0.14$). Это преобразование исходных данных позволяло применять параметрические методы статистики к логарифмированным значениям признаков.

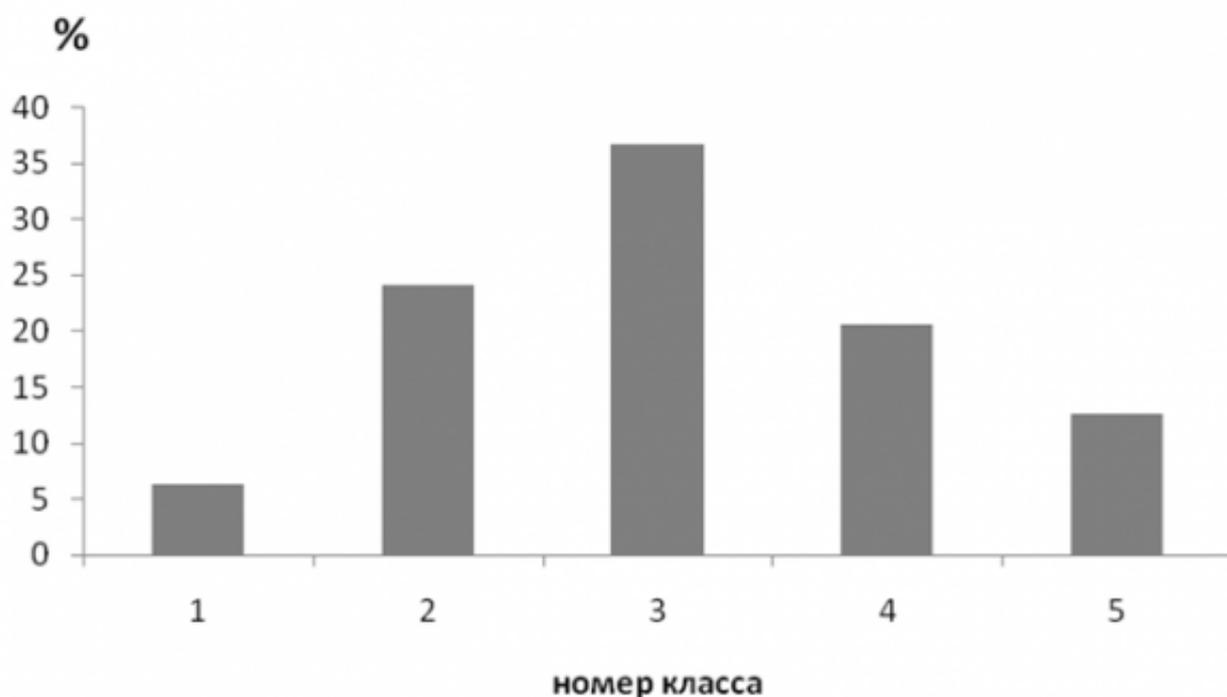


Рис. 2. Распределение логарифмированных значений концентраций фосфора общего
Fig. 2. The distribution of logarithmic data on the total phosphorous concentrations

Корреляционный анализ логарифмированных данных показал, что достоверные ($p < 0.05$) коэффициенты корреляции были рассчитаны между гидрохимическими показателями (содержание фосфора общего) и гидробиологическими показателями (биомасса фитопланктона и зоопланктона). Для прогноза гидробиологических показателей был применен регрессионный анализ, позволяющий по уравнению регрессии рассчитать одни показатели по другим (Kalinkina, 2011). Были рассчитаны два линейных уравнения регрессии, в которых все коэффициенты имели достоверное значение:

$$\log(B_{\text{фитопл}}) = (0.800 \pm 0.354) * \log(P_{\text{общ}}) - (1.551 \pm 0.457),$$

$$\log(B_{\text{зоопл}}) = (0.877 \pm 0.116) * \log(P_{\text{общ}}) - (1.254 \pm 0.149),$$

где $B_{\text{фитопл}}$ – биомасса фитопланктона $г/м^3$; $B_{\text{зоопл}}$ – биомасса зоопланктона, $г/м^3$; $P_{\text{общ}}$ – содержание фосфора общего $мкг/л$.

Прогнозные значения биомассы зоопланктона и фитопланктона были определены для различных концентраций фосфора общего, соответствующих разному состоянию водоема: 10 $мкг/л$ – олиготрофный тип; 20 $мкг/л$ – мезотрофный; 30 $мкг/л$ – пограничное состояние между мезотрофным и эвтрофным; 50 $мкг/л$ – эвтрофный тип. Расчеты средних значений показателей, а также границы доверительных интервалов с вероятностью 95% представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные значения биомассы фитопланктона и зоопланктона по величине концентрации фосфора общего (цит. по: Kalinkina, 2011)

	Биомасса фитопланктона, г/м ³			Биомасса зоопланктона, г/м ³		
	среднее	левая граница	правая граница доверительного интервала	среднее	левая граница доверительного интервала	правая граница доверительного интервала
10	0.177	0.004	7.803	0.420	0.126	1.406
20	0.309	0.004	22.353	0.772	0.197	3.027
30	0.427	0.004	41.372	1.102	0.256	4.741
50	0.643	0.005	89.856	1.726	0.357	8.343

Анализ этих материалов показал, что прогнозные значения гидробиологических показателей неудовлетворительно отражают состояние сообществ фито- и зоопланктона при различных концентрациях фосфора в воде. Так, средняя прогнозная биомасса фитопланктона при разных уровнях фосфора варьирует в пределах 0.177-0.643 г/м³, что соответствует олиготрофному типу водоема. В то же время регрессионная модель позволяет рассчитать слишком широкие доверительные интервалы, в которые входят весь спектр значений биомассы фитопланктона для озер от олиготрофного до эвтрофного типа. Результаты расчетов по регрессионной модели отражают высокую изменчивость биомассы фитопланктона при различных концентрациях фосфора.

Точность расчетов биомассы зоопланктона по величине концентрации общего фосфора несколько выше, хотя прогнозные значения также характеризуются существенным разбросом. Так, при концентрации фосфора 10 мкг/л средние прогнозные значения биомассы (0.42 г/м³) соответствуют низкому содержанию биогенного элемента, т. е. отражают олиготрофный статус озера. Однако границы доверительного интервала включают спектр значений биомассы зоопланктона - от олиготрофного до α-мезотрофного (0.126-1.406). С повышением концентрации фосфора точность прогноза снижается. При концентрации фосфора 20 мкг/л (мезотрофный статус) модель позволяет рассчитать среднюю биомассу, соответствующую олиготрофному статусу (0.772) г/м³, в пределы доверительного интервала входят значения биомассы, соответствующие и низкопродуктивным, и среднепродуктивным озерам (0.197-3.027). Наконец, при наибольшей концентрации фосфора (50 мкг/л) расчетная средняя биомасса зоопланктона составляет всего 1.726 г/м³, что соответствует α-мезотрофному статусу, а границы доверительного интервала включают значения биомассы, характерные и для олиготрофных (0.357), и для эвтрофных (8.343) озер.

Низкая прогнозная точность значений биомассы фитопланктона и зоопланктона, рассчитанных по величинам содержания общего фосфора в воде, связана с особенностями регрессионного анализа. По уравнению регрессии можно рассчитать лишь средние значения искомого показателя (функции) для конкретного значения аргумента. При большой изменчивости исходных данных возрастают дисперсия показателей, ошибка коэффициента регрессии, и, как следствие, точность прогноза (разброс значений в границах доверительного интервала) снижается. Именно эта ситуация наблюдается в случае применения регрессионного анализа к массиву данных по озерам Карелии. Несмотря на достоверность коэффициентов регрессии в полученных уравнениях зависимости гидробиологических показателей от содержания фосфора в воде, изменчивость биомассы фитопланктона и зоопланктона достаточно высока, что не позволяет выполнить их точное предсказание по концентрации фосфора в воде.

Поскольку для распределения признаков в массиве данных по озерам Карелии характерна ярко выраженная асимметрия (преобладание значений, характерных для низкопродуктивных озер), можно предположить, что при прогнозе значений искомого признака не все исходные показатели будут иметь одинаковый вес. Для того чтобы учесть разную представленность данных в выборке, необходим дифференцированный подход, а именно требуется разбить весь интервал значений показателей на градации и разработать алгоритм реконструкции недостающих данных для каждой градации в отдельности, что позволит повысить точность прогноза.

Реализовать такой подход можно с помощью таблиц сопряженности (Шитиков и др., 2005а). Для

создания таблиц сопряженности необходимо выполнить процедуру индексирования изучаемых водных объектов. Были разработаны два индекса на основе следующих групп показателей: гидрохимический индекс трофности (ГХтроф) – на базе значений содержания общего фосфора, общего азота, взвешенных веществ, хлорофилла «а» и гидробиологический индекс (ГБ) – на основе показателей биомассы зоопланктона и зообентоса. Данные показатели были выбраны за основу, поскольку между их логарифмированными значениями была обнаружена достоверная ($p < 0.05$) корреляция. Кроме того, выборки по значениям общего фосфора, биомассе зоопланктона и зообентоса оказались наибольшими среди других показателей.

Индексы по каждой группе показателей определяли с помощью кластерного анализа, который позволяет свести несколько признаков к одному – обобщенной мере расстояния между каждой парой или большим числом изученных объектов. По величине расстояния (евклидова мера) было выполнено разбиение объектов на три группы и присвоение каждой группе индекса – числа от 1 до 3, в ряду которых показатели возрастали. Согласно гидрохимической классификации озер, в первую градацию вошли холодноводные олиготрофные водоемы: Топозеро, Пяозеро, Паанаярви, Сегозеро, Куйто и другие озера с наименьшими значениями гидрохимических показателей. Во вторую градацию вошли озера: Ведлозеро, Суоярви, Падмозеро и другие, для которых характерны более высокие, чем для первой градации, показатели. Третья градация характеризуется наибольшей обособленностью от двух других. К этой группе относятся озера: Крошнозеро, Миккельское, Святозеро, Пряжинское, Яндомозеро с максимальными гидрохимическими показателями.

Согласно гидрохимической классификации озер, в первую градацию вошли холодноводные олиготрофные водоемы: Топозеро, Пяозеро, Паанаярви, Сегозеро, Куйто и другие озера с наименьшими значениями гидрохимических показателей. Во вторую градацию вошли озера: Ведлозеро, Суоярви, Падмозеро и другие, для которых характерны более высокие, чем для первой градации, показатели. Третья градация характеризуется наибольшей обособленностью от двух других. К этой группе относятся озера: Крошнозеро, Миккельское, Святозеро, Пряжинское, Яндомозеро с максимальными гидрохимическими показателями. Согласно данным дискриминантного анализа, точность разбиения озер на три градации по индексу ГХтроф составляла 96%.

При разработке индексации водных объектов по гидробиологическому индексу (ГБ) использовали показатели биомассы зоопланктона и зообентоса. Согласно данным дискриминантного анализа, точность разбиения озер на три градации по индексу ГБ составляла 74%.

На следующем этапе исследований приступили к анализу таблицы сопряженности между гидрохимическим (ГХтроф) и гидробиологическим (ГБ) индексами (табл. 2).

Таблица 2. Таблица сопряженности, основанная на градациях озер по гидрохимическим (строки) и гидробиологическим (столбцы) показателям

Градация строк – классы трофности по индексу ГХтроф	Градация столбцов – классы трофности по индексу ГБ			Итог по строкам
	1	2	3	
1	22	15	7	44
2	12	21	7	40
3	0	12	14	26
Итог по столбцам	34	48	28	110

По величине критерия χ^2 (25.7) между двумя индексами существует достоверная ($p < 0.05$) связь.

Следовательно, независимая оценка озер (их индексирование) по гидрохимическим и гидробиологическим показателям во многом совпадает. Исходя из таблицы сопряженности (см. табл. 2) можно составить прогнозную таблицу для расчета гидробиологических данных по гидрохимическим параметрам. Для составления такой таблицы необходимо выразить число озер в каждой градации по индексу ГХтроф в относительных единицах – в процентах от итога по строкам (табл. 3).

Таблица 3. Распределение вероятностей между возможными значениями гидробиологических показателей при различных градациях индекса ГХтроф

Градация по индексу ГХтроф	Распределение вероятностей между возможными значениями гидробиологических показателей, %
----------------------------	--

	1	2	3
1	50	34	16
2	30	53	18
3	0	46	54

Для прогноза достаточно определить по исходным гидрохимическим показателям, к какой из градаций индекса ГХтроф принадлежит данный водоем. Если для водоема определена первая градация по индексу ГХтроф, то в соответствующей строке (первой) надо найти ячейку, где располагается наибольшая доля озер для первой градации по индексу ГБ1. В данном случае – это первая ячейка, где доля озер составила 50%. Таким образом, согласно табл. 5, можно утверждать, что с вероятностью 50% для данного озера будут характерны такая биомасса зоопланктона и зообентоса, которые определены для градации 1 индекса ГБ.

Несмотря на то, что прогноз получен, его пятидесятипроцентный уровень вероятности не соответствует высокой точности прогноза. В связи с этим была выбрана нижняя критическая граница вероятности, составляющая 70% от общей выборки озер. Для достижения заданной вероятности необходимо выполнить сложение вероятностей в двух соседних ячейках и выбрать максимальную сумму. В случае равномерного (по 33%) распределения озер среди трех ячеек прогноз данных следует считать невозможным.

В данном случае сумма вероятностей оказалась наибольшей (84%) для первой и второй градаций в первой строке. Тогда для градации ГХтроф=1 прогнозные значения гидробиологических показателей будут рассчитаны как средние для первой и второй градаций по индексу ГБ.

Для градации 2 по индексу ГХтроф максимальное значение наблюдается во второй ячейке второй строки (53%), однако эта величина меньше 70%. Большая сумма из двух соседних ячеек (первой и второй) во второй строке составила 83%. Следовательно, для озер с градацией индекса ГХтроф, равной 2, также прогнозные гидробиологические показатели составят среднюю величину для первой и второй градаций по индексу ГБ.

Рассмотрим градацию 3 по индексу ГХтроф. В первой ячейке, соответствующей градации 1 по индексу ГБ1, озера отсутствуют. Это отражает закономерную связь гидрохимических показателей с гидробиологическими. При высоких значениях общего фосфора, характерных для третьей градации индекса ГХтроф, в данной группе озер не может быть низких значений биомассы зоопланктона и зообентоса. Все озера в третьей строке распределились между второй (46%) и третьей ячейками (54%). Это значит, что с вероятностью 54% в озерах, для которых определена градация 3 по индексу ГХтроф, будет наблюдаться наибольшая биомасса зоопланктона и зообентоса, характерная для градации 3 по индексу ГБ. Поскольку была принята критическая граница (70%), отделяющая закономерные значения от случайных в каждой градации озер, было выполнено сложение вероятностей (54 + 46 = 100%), которые объединили градации 2 и 3 по гидробиологическому индексу. Это значит, что для озер с градацией 3 по индексу ГХтроф с вероятностью 100% будут наблюдаться такая биомасса зоопланктона и зообентоса, которая соответствует средним показателям для градаций 2 и 3 по индексу ГБ.

Таким образом, для изучаемой выборки озер выявлена достоверная связь между гидрохимическими и гидробиологическими показателями. Таблица сопряженности иллюстрирует существование двух достаточно близких классов водоемов с малой продуктивностью (1 и 2), которые составляют большинство выборки. Третий класс представляет собой меньшую группу озер с большей трофностью, которая контрастно отличается от 1 и 2 группы водоемов.

Оценка точности прогноза

На следующем этапе исследований была выполнена проверка точности реконструкции гидроэкологических данных на основе таблиц сопряженности. С этой целью весь массив данных разделили случайным образом на два блока. Первый блок включал данные с четными порядковыми номерами озер, второй – с нечетными номерами. Для первого блока данных были рассчитаны индексы ГХтроф и ГБ. По результатам анализа данных первого блока оказалось, что связь между индексами ГХтроф и ГБ достоверна ($\chi^2 = 25.3; p < 0.05$), что отражает таблица сопряженности (табл. 4). В целом, наблюдается совпадение градаций озер по двум индексам.

По результатам анализа данных второго блока оказалось, что связь между индексами ГХтроф и ГБ достоверна ($\chi^2 = 25.3; p < 0.05$), что отражает таблица сопряженности (табл. 4). В целом, наблюдается совпадение градаций озер по двум индексам.

Таблица 4. Таблица сопряженности между индексами ГХтроф и ГБ, основанная на данных для

озер с четными порядковыми номерами

Градация строк – классы трофности по индексу ГХтроф	Градация столбцов – классы трофности по индексу ГБ			Итого по строкам
	1	2	3	
1	14	10	2	26
2	11	7	1	19
3	0	5	9	14
Итого по столбцам	25	22	12	59

Нетрудно заметить, что распределение озер в таблице сопряженности, разработанной на основе данных для озер с четными номерами (табл. 4), хорошо согласуется с распределением озер в таблице сопряженности, рассчитанной для всего массива данных (табл. 2). Это свидетельствует о репрезентативности выбранного блока данных по озерам с четными порядковыми номерами.

На основе таблицы сопряженности (табл. 4) была рассчитана прогнозная таблица, в которых рассчитывается распределение вероятностей показателей для каждой градации признаков. В табл. 5 представлено распределение вероятностей между возможными значениями гидробиологических показателей для разных градаций гидрохимического индекса.

Таблица 5. Распределение вероятностей между возможными значениями гидробиологических показателей при различных градациях индекса ГХтроф (массив данных с четными номерами озер)

Градации по индексу ГХтроф	Вероятность между возможными значениями гидробиологических показателей, %		
	1	2	3
1	54	38	8
2	58	37	5
3	0	36	64

На основе массива данных с четными номерами озер были рассчитаны границы диапазонов гидрохимических и гидробиологических показателей для трех градаций по каждому индексу. Такие таблицы получили название определительных. В табл. 6 представлены характеристики трех градаций индекса ГХтроф по содержанию общего фосфора.

Таблица 6. Содержание общего фосфора (мкг/л) в воде озер, относящихся к разным градациям по индексу ГХтроф (по данным с четным порядковым номером озер)

Градация	Средняя арифметическая	Границы интервала	
		минимум	максимум
1	9,8	6,4	13,3
1 и 2	13,2	9,8	16,6
2	17,4	13,6	21,2
2 и 3	31,0	16,8	45,2
3	51,5	32,8	70,1

Минимальные и максимальные значения показателей для каждой градации составляли границы доверительного интервала для уровня значимости 0.001. Сходные таблицы были рассчитаны для показателей биомассы зоопланктона и зообентоса (табл. 7, 8).

Таблица 7. Биомасса зоопланктона (г/м³) в воде озер, относящихся к разным градациям по индексу ГБ (по данным с четным порядковым номером озер)

Градация	Средняя арифметическая	Границы интервала	
		минимум	максимум
1	0,29	0,16	0,43
1 и 2	0,63	0,20	1,07
2	1,07	0,33	1,82
2 и 3	2,22	0,34	4,09
3	3,93	1,83	7,43

Таблица 8. Биомасса зообентоса (г/м²) в воде озер, относящихся к разным градациям по индексу ГБ (по данным с четным порядковым номером озер)

Градация	Средняя арифметическая	Границы интервала	
		минимум	максимум
1	2,13	0,53	3,74
1 и 2	1,77	0,22	3,31
2	1,32	0,77	2,23
2 и 3	3,41	0,72	6,10
3	6,70	2,95	10,45

Определительные таблицы, разработанные для первого блока данных (для озер с четным порядковым номером), апробировали на данных второго блока, включающего озера с нечетными порядковыми номерами. Процедура апробации включала следующие три этапа: 1) по табл. 6 присвоить каждому озеру из второго блока на основании показателя общего фосфора значения индекса ГХтроф; 2) по табл. 5 выполнить прогноз значений индекса ГБ для каждого озера из второго блока данных; 3) по табл. 7 и 8 определить прогнозируемые показатели биомассы зоопланктона и зообентоса для каждого озера из второго блока данных; 4) определить долю озер из второго блока данных, для которых наблюдаемое значение гидробиологического показателя оказалось в пределах прогнозируемого интервала значений. Результаты проверки точности прогноза показателей представлены в табл. 9 и 10.

Таблица 9. Оценка точности прогноза биомассы зоопланктона по показателю содержания общего фосфора

Показатель	Градации индекса ГХтроф			Всего
	1	2	3	
Количество озер*	20	25	21	66
Доля озер с совпадением расчетных и исходных данных, %	55	56	86	65**

Примечание: * – количество озер из второго массива данных, для которых имелись данные по содержанию общего фосфора и биомассе зоопланктона; ** – доля озер с совпадением расчетных и исходных данных для выборки 56 озер.

Таблица 10. Оценка точности прогноза биомассы зообентоса по показателю содержания общего фосфора

Показатель	Градации индекса ГХтроф			Всего
	1	2	3	
Количество озер*	21	23	21	65
Доля озер с совпадением расчетных и исходных данных, %	71	78	71	74**

Примечание: см. табл. 9. В целом точность реконструкции гидробиологических данных по содержанию общего фосфора была достаточно высокой и составила 65–74%. При этом максимальная точность (86% совпадения расчетных и исходных данных) была достигнута при реконструкции биомассы зоопланктона для третьей градации озер по индексу ГХтроф. Для целей рыбохозяйственной оценки водоемов эту точность можно считать достаточной. На заключительном этапе исследований на основе анализа полного массива данных были рассчитаны определительные таблицы для прогноза гидробиологических показателей по содержанию общего фосфора (табл. 11, 12, 13).

Таблица 11. Содержание общего фосфора (мкг/л) в воде озер, относящихся к разным градациям по индексу ГХтроф (анализ полного массива данных)

Градация	Среднее	Левая граница доверительного интервала	Правая граница доверительного интервала
1	10,5	6,6	14,3
Среднее между 1 и 2	14,4	11,3	17,5
2	18,3	14,8	21,7
Среднее между 2 и 3	30,2	21,2	39,1
3	48,5	35,3	61,8

При сравнении табл. 11, где представлены данные по всему массиву, и табл. 6, где отражены градации содержания общего фосфора для блока данных по озерам с четными номерами, следует отметить близкие характеристики интервалов для разных градаций. При попарном сравнении каждой из градаций двух таблиц оказалось, что средние величины этих градаций достоверно не различаются ($p < 0.001$). Данный факт свидетельствует о том, что выборка из озер с четными номерами была репрезентативна относительно исходного массива данных по озерам Карелии.

В табл. 12 представлены характеристики градаций показателей биомассы зоопланктона по индексу ГБ, разработанные по всему массиву данных.

Таблица 12. Биомасса зоопланктона ($г/м^3$) в воде озер, относящихся к разным градациям по индексу ГБ (анализ полного массива данных)

Градация	Среднее	Левая граница доверительного интервала	Правая граница доверительного интервала
1	0,37	0,20	0,54
Среднее между 1 и 2	0,83	0,42	1,25
2	1,09	0,50	1,68
Среднее между 2 и 3	1,94	0,39	3,49
3	3,63	1,13	7,79

В табл. 13 представлены характеристики градаций показателей биомассы зообентоса по индексу ГБ, разработанные по всему массиву данных. При сравнении табл. 12 и 7, где представлены характеристики градаций по биомассе зоопланктона, разработанные на половине выборки (озера с четными порядковыми номерами), отмечается высокое сходство между полученными средними и доверительными интервалами каждой градации при попарном их сравнении.

Таблица 13. Биомасса бентоса ($г/м^2$) в воде озер, относящихся к разным градациям по индексу ГБ (анализ полного массива данных)

Градация	Среднее	Левая граница доверительного интервала	Правая граница доверительного интервала
1	1,01	0,76	1,26
Среднее между 1 и 2	1,37	0,67	2,07
2	1,57	0,94	2,63
Среднее между 2 и 3	3,32	1,46	5,18
3	6,82	3,21	10,43

Сравнение таблиц 13 и 8 показывает их заметное различие. Так, в таблице 8 отсутствует закономерное нарастание средних показателей биомассы бентоса от градации 1 к градации 2. В табл. 13 (анализ полного массива данных) нарастание показателей биомассы бентоса в ряду градаций закономерное. Это отражает большую вариабельность показателей зообентоса, связанную с мозаичностью пространственного распределения организмов.

Обсуждение

Анализ данных по озерам Карелии показал, что для изучаемой выборки характерна асимметрия: преобладают олиго-мезотрофные водоемы, в то время как представленность эвтрофных озер весьма мала. По результатам анализа было выделено три группы озер. Первая группа (олиготрофные озера, которые устойчиво сохраняют свою невысокую продуктивность) отражает влияние на водоемы региональных факторов - низкой температуры воды, малой скорости выщелачивания химических

элементов из подстилающих пород, что, в конечном счете, определяет невысокий трофический статус этих водоемов. В силу малых концентраций фосфора и достаточно большого объема воды эти экосистемы трудно вывести из олиготрофного состояния, поскольку сильные антропогенные источники биогенных элементов вокруг этих озер отсутствуют.

Вторая группа – это озера, которые могут быть отнесены либо к олиготрофному, либо к мезотрофному статусу. Причинами существования таких озер с «неопределенным статусом» являются геоэкологические особенности карельского региона. В Карелии слишком велико значение осадков, регулярно выпадающих на водосборные площади озер, переменчива температура в вегетационный период. Это, в свою очередь, обеспечивает достаточно быстрое изменение гидрологических условий, а значит, и гидрохимического режима. Особенно подвержено межсуточной динамике содержание в воде биогенных элементов.

Третья группа – эвтрофные озера, подверженные действию антропогенного фактора, для которых отмечаются наиболее высокие уровни фосфора в воде.

Поскольку различия между некоторыми озерами сглажены, то для наиболее точного их разделения необходимо привлекать информацию сразу по нескольким показателям, а это значит, что в основу классификации должны быть положены комплексные индексы (Шитиков и др., 2005а). Механизмом для определения таких индексов может послужить кластерный и дискриминантный анализ, последний позволяет рассчитать функции дискриминации для отнесения озера к той или иной градации и, соответственно, присвоения водоему того или иного индекса.

На существование сложностей в оценке трофического статуса водоемов и необходимость расчета комплексных индексов указывает С. П. Китаев (2009). Согласно его данным, для оз. Онежского лишь 50% различных показателей свидетельствовали об олиготрофном статусе этого водоема, 13% – об ультраолиготрофном, 37% – о мезотрофном статусе. Для Ладожского озера оценки также перекрывались: по 56% показателей озеро было оценено как мезотрофное, по 19% – олиготрофное; по 6% – ультраолиготрофное; по 19% показателей – эвтрофное. Псковско-Чудское озеро характеризовалось следующим спектром оценок: 50% показателей позволили оценить этот водоем как мезотрофный, 6% – как ультраолиготрофный; 24% – как эвтрофный; 20% – как гиперэвтрофный. В связи с изменчивостью характеристик озер С. П. Китаевым был предложен «индекс трофического статуса», который базируется на средневзвешенной оценке по комплексу показателей. Такой подход позволяет более точно оценить продуктивные возможности экосистемы.

В работе С. П. Китаева (2009) указывается также на стохастический характер оценок экосистем по гидроэкологическим показателям. Действительно, чтобы описать изменчивое состояние системы, необходимо применение вероятностного подхода, когда для озера рассматривается несколько возможных состояний и для каждого состояния дается оценка вероятности его проявления. В настоящей работе был применен именно такой подход с использованием таблиц сопряженности, которые позволяют выяснить, насколько точно можно предсказать значение одного признака по величине другого. В отличие от регрессионного анализа в данном случае может быть получено распределение вероятностей между возможными значениями первого признака при известном значении второго. Преимуществом данного подхода является возможность изучения связей между показателями, распределение значений которых не обязательно подчиняется нормальному закону (Шитиков и др., 2005б).

Итогом настоящих исследований оказались определительные таблицы, в которых представлены характеристики трех градаций (средняя арифметическая и пределы доверительного диапазона) для показателей: содержание общего фосфора в воде, биомасса зоопланктона и зообентоса. Определительные таблицы предназначены для реконструкции биомассы зоопланктона и зообентоса по содержанию общего фосфора в воде с точностью 65–74%. Реконструированные данные могут быть использованы для оценки кормовой базы рыб и трофического статуса озер, что имеет большое значение при рыбохозяйственном исследовании озер.

Метод реконструкции гидробиологических данных по содержанию в воде общего фосфора с использованием таблиц сопряженности и определительных таблиц может найти применение для водоемов всего северо-западного региона России – не только Карелии, но и Кольского полуострова, Ленинградской, Вологодской, Архангельской областей. Географическое положение озер этого региона предопределяет в целом сходные климатические и геологические факторы, обуславливающие показатели их природной продуктивности.

Заключение

1. Выявлена асимметрия распределения гидрохимических и гидробиологических показателей массива данных (общее число озер 170), что отражает действие двух групп факторов. К первой группе относятся климатический и геологический факторы, определяющие региональные особенности водоемов Карелии, их олиго-мезотрофный характер в основном большинстве анализируемого массива. Антропогенный фактор определяет существование эвтрофной группы озер, составляющей менее 1/10 анализируемой выборки.

2. Регрессионный анализ не позволил выполнить реконструкцию гидробиологических данных в связи с их высокой изменчивостью.

3. Разработаны комплексные гидрохимические и гидробиологические индексы, отражающие трофический статус озер; с использованием новых индексов выполнена классификация озер Карелии.

4. С использованием методов многомерной статистики и информационного анализа прослежены связи между гидрохимическими параметрами и гидробиологическими показателями. Рассчитаны прогнозные и определительные таблицы, позволяющие реконструировать данные по биомассе зоопланктона и зообентоса на основе данных по содержанию общего фосфора в воде озер.

5. На основе данных по содержанию фосфора в воде выполнена реконструкция показателей биомассы зоопланктона для 66 озер с точностью 55-86%, а также реконструкция показателей биомассы зообентоса для 65 озер с точностью 71-78%.

Библиография

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

Ивантер Э. В., Коросов А.В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 304 с.

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

Китаев С. П. Комплексная оценка продукционных возможностей озер и количественная типология («индексы трофического статуса») // X съезд Гидробиологического общества при РАН, 28 сентября – 2 октября 2009 г.: Тез. докл. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 187-188.

Меншуткин В. В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск; СПб: Изд-во КарНЦ РАН, 2010. 419 с.

Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., Потахин М. С. Экспертная система "Озера Карелии". 1. Порядковые и номинальные характеристики озер // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 2. С. 160-171.

Пузаченко Ю. Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 416 с.

Розенберг Г. С., Саксонов С. В., Костина Н. В., Кудинова Г. Э. Оценка состояния и подходы к управлению биоресурсами Средней и Нижней Волги // Фундаментальные основы управления биологическими ресурсами. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. С. 351-360.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. Кн. 2. М.: Наука, 2005а. 337 с.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Костина Н. В. Методы синтетического картографирования территории (на примере эколого-информационной системы «Volgabs») // Количественные методы экологии и гидробиологии: Сб. науч. тр., посвященный памяти А. И. Баканова. Отв. ред. чл.-корр. РАН Г. С. Розенберг. Тольятти: Изд-во СамНЦ РАН, 2005б. С. 167-227.

Kalinkina N. M. Relationship between hydrobiological and hydrochemical parameters of lakes of Karelia as influenced by their geoecological characteristics / Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 8th International Scientific and practical conference. June 20-22, 2011. Vol. 2. Rezekne, 2011. P. 352-355.

The reconstruction of hydrobiological data for lakes of Karelia

**KALINKINA
Nataliya**

*Institute of Northern Water Problems of the Karelian
Research Centre of the Russian Academy of Sciences
(NWPI), kalina@nwpi.krc.karelia.ru*

Keywords:

lakes of Karelia; classification;
hydrochemical and hydrobiological
parameters; contingency tables;
prognoses

Summary:

The factors which determined the variability of hydrochemical and hydrobiological parameters of lakes of Karelia (in total 225 lakes) are analyzed. It is shown that oligo-mesotrophic lakes dominate among studied water bodies whereas the share of eutrophic lakes is low (about 10%). The biomass of phytoplankton and zooplankton was not exactly reconstructed by using the total phosphorous concentration as the argument in regression analysis due to high variability of these parameters. The hydrochemical and hydrobiological indexes were worked to classify the lakes of Karelia. The methods of prognoses of zooplankton biomass (with accuracy of 55-86%) and benthos biomass (with accuracy of 71-78%) on the base of the total phosphorous concentration were worked by using the contingency tables.