

А.В. Коросов¹, Н.М. Калинин², Е.В. Теканова³,
М.Т. Сярки⁴, К.В. Исакова⁵

РАЗРАБОТКА ИНДЕКСОВ ТРОФНОСТИ ДЛЯ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА С ПОМОЩЬЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

АННОТАЦИЯ

Использованы ГИС-технологии для изучения пространственного распределения зон трофности на акватории Онежского озера. Основой для построения карт послужили эмпирические данные, отражающие трофность вод, собранные в 1982–2020. Для оценки влияния изменений климата отдельно рассмотрели два периода – до и после 2000 г. В качестве показателей трофности использовали количество сапрофитного бактериопланктона, биомассу рачкового зоопланктона, концентрацию хлорофилла «а» и прозрачность воды. Все характеристики были приведены к нормальному распределению, а значения в отдельных точках интерполированы на всю акваторию озера, которую представили как сеть из 544 квадратов. Каждая ячейка акватории несла четыре значения изучаемых показателей. Для оценки трофности использована многомерная статистика (анализ главных компонент) и экспертная система (байесовский классификатор). Первая главная компонента может рассматриваться как интегральное значение трофности в данной части акватории. Метод классификации по формуле Байеса позволяет получить оценку вероятности отнесения каждой ячейки акватории к классу «высокая трофность» и «низкая трофность» и назначить порог значимости ($p = 0,05$). Картограммы, построенные на основе обоих методов, в основных чертах совпали. Большая часть акватории Онежского озера характеризуется низким уровнем трофии. В северо-западной части, где на побережье расположены крупные города (Петрозаводск и Кондопога) в прошлом веке обнаруживается обширная область с высокой трофностью, связанная с активным антропогенным загрязнением онежских вод. В последние годы из-за падения производства трофность в этой зоне резко снизилась, за исключением Кондопожской губы, в которой наблюдается увеличение загрязнения воды в результате деятельности форелевых хозяйств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Онежское озеро, ГИС, анализ главных компонент, трофность водоема, экспертная система.

¹ Федеральный исследовательский центр "Карельский научный центр РАН" Институт водных проблем Севера Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, просп. А. Невского, 50 *e-mail:* korosov@mail.ru

² Федеральный исследовательский центр "Карельский научный центр РАН" Институт водных проблем Севера Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, просп. А. Невского, 50 *e-mail:* cerioda@mail.ru

³ Федеральный исследовательский центр "Карельский научный центр РАН" Институт водных проблем Севера Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, просп. А. Невского, 50 *e-mail:* etekanova@mail.ru

⁴ Федеральный исследовательский центр "Карельский научный центр РАН" Институт водных проблем Севера Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, просп. А. Невского, 50 *e-mail:* msyarki@mail.ru

⁵ Федеральный исследовательский центр "Карельский научный центр РАН" Институт водных проблем Севера Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, просп. А. Невского, 50 *e-mail:* ksusha_isakova@mail.ru

Andrey V. Korosov¹, Nataliia M. Kalinkina², Elena V. Tekanova³, Mariya T. Syarki⁴,
Kseniya V. Isakova⁵

DEVELOPMENT OF TROPHIC INDICES FOR LAKE ONEGO USING OF THE ECOLOGICAL INFORMATION SYSTEM

ABSTRACT

GIS technologies were used to study the spatial distribution of zones with different trophic conditions in the water area of Lake Onego. Empirical data on the trophic conditions of waters sampled in 1982–2020 were as the basis for the map development. Two periods, before and after 2000, were considered separately to assess the impact of climate change. As indicators of trophic conditions, the number of saprophytic bacterioplankton, biomass of crustacean zooplankton, concentration of chlorophyll "a" and water transparency were used. All characteristics were converted to a normal distribution, and the values at individual points were interpolated for the entire water area of the lake, which was presented as a network of 544 squares. Each cell of the water area was characterized by four values of indicators. To assess trophic conditions, multivariate statistics (principal component analysis) and an expert system (Bayesian classifier) were used. The first principal component can be considered as the integral value of trophic conditions in a given part of the water area. The Bayesian classification method allows to get an estimate of the probability of classifying each cell in the water area as "high trophic conditions" and "low trophic conditions" and assign a significance threshold ($p = 0.05$). The cartograms built on the basis of both methods are basically the same. Most of Lake Onego area is characterized as low trophic conditions. The vast area with high trophic conditions was identified in the northwestern part of Lake Onego where on the coast large cities are located (Petrozavodsk and Kondopoga), which is associated with active anthropogenic pollution in the last century. In recent years, due to industry recession, trophic conditions in this area has sharply decreased, with the exception of Kondopozhskaya Bay, where there is an increase in water pollution as a result of trout farms.

KEY WORDS: Lake Onego, GIS, principal component analysis, trophic conditions of water body, expert system.

ВВЕДЕНИЕ

Онежское озеро относится к Великим озерам мира [*Ladoga, Onego...*, 2010] и обладает вековыми запасами чистой пресной воды (295 км³). В свете возрастающей проблемы дефицита пресной воды в мире это в значительной степени определяет социально-экономическую значимость Онежского озера для устойчивого развития северо-западного региона России. Как и большинство пресных водоемов, озеро испытывает негативное воздействие антропогенных факторов, что проявляется, главным образом, в возрастании уровня трофии. Это определяет необходимость разработки современных подходов для

¹ Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Northern Water Problems Institute, Republic of Karelia, 185030 Petrozavodsk, prosp. A. Nevsky, 50 e-mail: korosov@mail.ru

² Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Northern Water Problems Institute, Republic of Karelia, 185030 Petrozavodsk, prosp. A. Nevsky, 50 e-mail: cerioda@mail.ru

³ Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Northern Water Problems Institute, Republic of Karelia, 185030 Petrozavodsk, prosp. A. Nevsky, 50 e-mail: etekanova@mail.ru

⁴ Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Northern Water Problems Institute, Republic of Karelia, 185030 Petrozavodsk, prosp. A. Nevsky, 50 e-mail: msyarki@mail.ru

⁵ Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Northern Water Problems Institute, Republic of Karelia, 185030 Petrozavodsk, prosp. A. Nevsky, 50 e-mail: ksusha_isakova@mail.ru

контроля за состоянием его экосистемы, дающих возможность для оперативного анализа происходящих в ней изменений.

На протяжении нескольких лет в лаборатории гидробиологии Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН разрабатывается экологическая информационная система Онежского озера, включающая в себя базы экологических данных, геоинформационную систему, экспертную систему [Калинкина и др., 2018]. С ее помощью исследуются процессы, протекающие в озере. В настоящей работе представлены возможности практического использования геоинформационной системы по оценке экологического состояния Онежского озера и его изменению в последние 30 лет.

Вследствие изрезанности береговой линии и больших перепадов глубин Онежское озеро очень неоднородно в гидрологическом и гидробиологическом отношении [Онежское озеро. Атлас, 2010]. Отдельные части акватории сильно различаются по уровню продуктивности – от среднепродуктивных (Кондопожская губа) до низкопродуктивных (открытый плес) [Экосистема..., 1990; Онежское озеро..., 1999; Крупнейшие..., 2015]. Помимо топографических факторов на продуктивность озерной экосистемы влияют и другие причины. В 1980-е годы велико было воздействие на экосистему Онежского озера антропогенных факторов, главным образом, загрязнение промышленными и коммунальными сточными водами [Тимакова и др., 2014]. В настоящее время появился новый антропогенный фактор, влияющий на экосистему озера – отходы товарного форелеводства [Крупнейшие..., 2015]. Из природных факторов наиболее интересен новый – потепление климата, достаточно серьезно проявляющийся в Карелии в последние 20 лет [Диагноз..., 2020]. Теплые зимы приводят к росту объема зимнего стока речных вод, насыщенных гумусовыми веществами, поступающих с незамерзающих болот, и тем самым – к «браунификации», т.е., к увеличению цветности воды и содержания в ней растворенного органического углерода, а также росту концентраций сопутствующих, небезвредных веществ [Kalinkina et al., 2020]. Для изучения влияния этих факторов на уровень трофии Онежского озера были сформированы два блока данных за периоды 1982–2000 гг. и 2001–2020 гг., которые были проанализированы отдельно.

Об изменении трофности озерной экосистемы можно судить по многим показателям [Китаев, 1984; Алимов, 1989; Менишуткин и др., 2009а; 2009б; Алимов и др., 2013]. Выбор в настоящей работе критериев оценки трофии Онежского озера (сапрофитные бактерии, хлорофилл «а», биомасса зоопланктона, прозрачность воды) был определен тем, что на фоне природной олиготрофии водоема даже небольшое повышение концентраций биогенных веществ и доступного в качестве трофического ресурса органического вещества в воде Онежского озера вызовет быструю реакцию сапрофитного бактериопланктона, фитопланктона, зоопланктона и скажется на прозрачности воды. Используемая нами процедура объединяет эти показатели в интегральную оценку, усиливая диагностический эффект для каждой части акватории Онежского озера.

Цель исследований состояла в разработке индексов трофности для Онежского озера и оценке многолетних изменений трофического состояния разных районов водоема.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для разработки индексов трофности Онежского озера были использованы традиционно применяемые для оценки трофности водных экосистем показатели – хлорофилл «а» и биомасса зоопланктона [Винберг, 1960; Бульон, 1983; Китаев, 1984; Андроникова, 1996; Carlson, 1977]. Кроме того, для оценки трофности различных районов озера были применены такие показатели как количество сапрофитных бактерий и прозрачность воды, предложенные О.П. Оксийюк и соавторами (1993) в комплексной экологической классификации качества поверхностных вод суши в качестве трофо-сапробиологических характе-

ристик состояния водной экосистемы. Выборки по этим показателям извлечены из зарегистрированных баз данных Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр РАН».

Использованы следующие слои ГИС: слой области акватории (береговой линии), четыре слоя сети точек отбора проб разных показателей, слой сети прямоугольных выделов для экстраполяции данных. Существенными моментами обработки количественной информации выступают три этапа: извлечение выборок из баз данных и предварительная их подготовка для обработки, экстраполяция локальных данных на всю акваторию водоема, анализ данных методами многомерной статистики и пространственная экстраполяция результатов, применение элементов экспертной системы: расчет индексов и их пространственная экстраполяция на акваторию Онежского озера.

Формирование выборок данных

Для унификации показателей, которые подвержены сезонной изменчивости, в анализ были вовлечены пробы из поверхностного слоя, отобранные в летний период (июль–август). В это время для большинства водных сообществ характерны максимальные показатели численности и биомассы, поэтому такие оценки оказываются наиболее точными. Единицы измерений были следующие: численность сапрофитного бактериопланктона – КОЕ/мл, концентрация хлорофилла «а» – мкг/л, прозрачность – м, биомасса зоопланктона – мг/куб. м.

Предварительный анализ показал (рис. 1), что все показатели, кроме прозрачности, имеют логнормальное распределение, поэтому они были предварительно прологарифмированы и в такой форме включены в анализ.

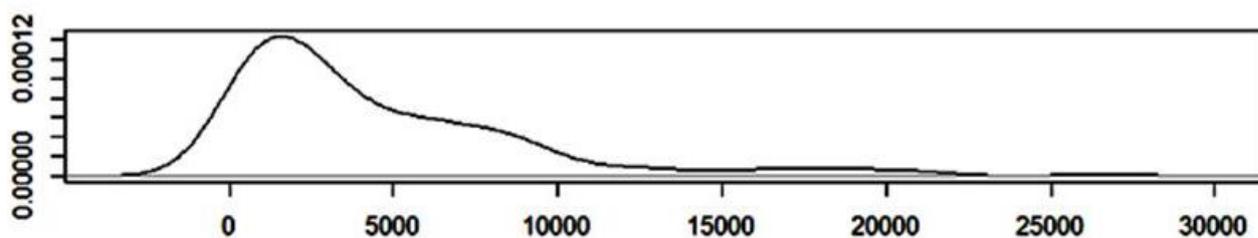


Рис. 1. Правосторонняя асимметрия распределения биомассы зоопланктона; по оси абсцисс – биомасса, мг/куб.м, по оси ординат – относительная частота

Fig. 1. Right-sided asymmetry of the distribution of zooplankton biomass; on the abscissa axis – biomass, mg / cubic meter, on the ordinate axis – relative frequency

Ограничение периода отбора проб существенно сказалось на количестве данных, а также на числе точек отбора проб. Если всего на акватории озера за весь период исследований пробы многократно отбирались в 319 точках, то для летнего периода их число сократилось в некоторых случаях до 22 (табл. 1, рис. 2).

Табл. 1. Число проб / число точек отбора проб для разных показателей
 Table 1. Number of samples / number of sampling points for different indicators

Период	Численность бактериопланктона	Хлорофилл «а»	Прозрачность	Биомасса зоопланктона
До 2000 г.	131 / 53	94 / 48	53 / 32	178 / 71
После 2000 г.	272 / 84	324 / 84	135 / 41	61 / 22

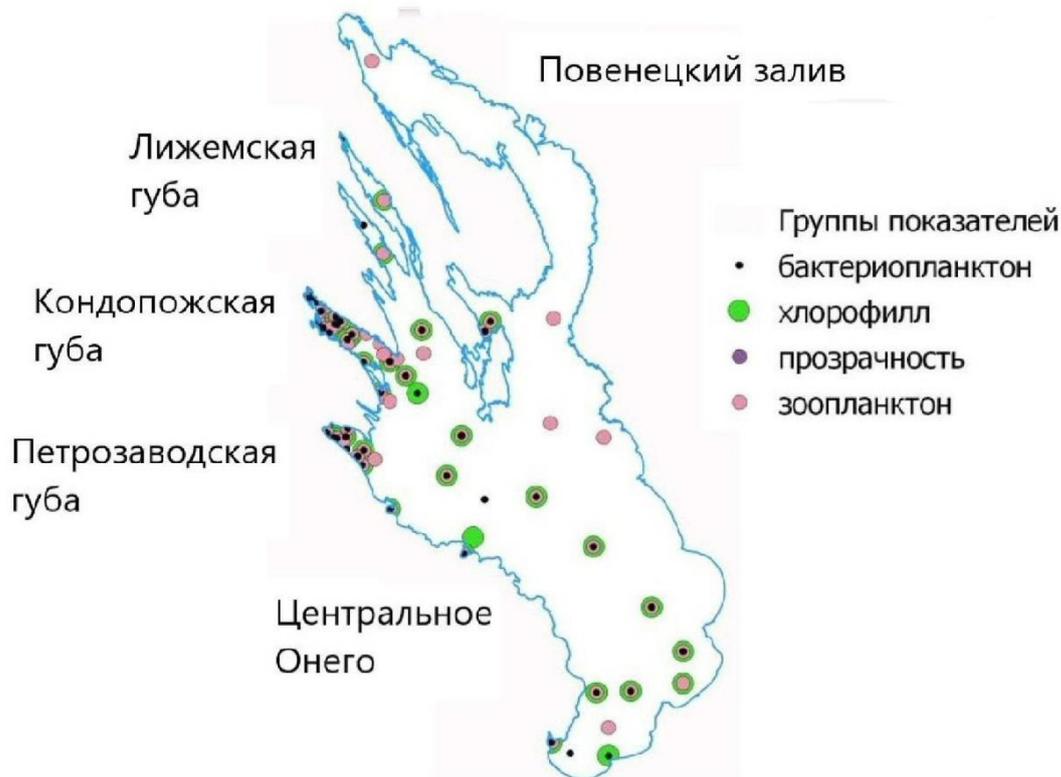


Рис. 2. Точки отбора проб для оценки выбранных показателей
 Fig. 2. Sampling points for evaluating of selected indicators

Для изучения пространственного распределения показателей по акватории Онежского озера, необходимо было получить один слой данных (в терминах ГИС «слой» – это карта, отражающая расположение в пространстве изучаемых объектов), т.е. для каждой станции данные необходимо было обобщить по серии лет. Как можно судить по таблице 1, в среднем на одну станцию приходилось по 3–4 пробы. В реальности число повторных проб варьировало от 1 до 17, поэтому в качестве обобщающего показателя приняли медиану, как реальное, наиболее характерное значение, имеющее смысл и при $n = 1$.

Поскольку отбор проб в разные годы выполнялся разными исследователями с различными целями и в разных точках, в базе данных оказалось небольшое число точек, которые имеют оценки всех четырех изучаемых показателей. Для периода до 2000 г. их 19, для периода после 2000 г. – 21 (это менее половины от имеющихся точек). Эти выборки далее использовались для проведения анализа зависимостей между показателями.

В то же время, несмотря на географическое несовпадение точек отбора проб при изучении разных показателей, зачастую они брались в сходных зонах и вполне могут быть использованы для совместного анализа, если использовать процедуру пространственной интерполяции показателей, полученных в одной точке, на соседнюю акваторию и на соседние точки, в которых отбирались пробы других показателей. В этом случае появляется возможность «совместить» точки отбора проб и увеличить выборку для анализа. В качестве основы для совмещения ближних точек отбора проб была выбрана квадратная ячейка размером 5×5 км. Процедура интерполяции имеющихся показателей на всю акваторию позволяет получить обширные искусственные выборки этих показателей для тех частей акваторий, в которых вовсе не проводился отбор проб.

Интерполяция показателей выполняется на полный охват (экстент) слоя отбора проб, который имеет прямоугольную форму, общее число ячеек оказалось равно 1470, часть из них, естественно, выходит за границы береговой линии и исключается из дальнейшего рассмотрения; остается 544 ячейки, для которых и проводился анализ.

Таким образом, основой для анализа выступали два типа выборок. Во-первых, это две небольшие выборки точек отбора проб, для которых имеются все четыре изучаемых показателя: одна выборка для периода до 2000 г. ($n = 21$), вторая выборка для периода после 2000 г. ($n = 19$). Во-вторых, две обширные выборки (для двух периодов) с четырьмя значениями интерполированных показателей для 544 ячеек, покрывающих всю акваторию Онежского озера.

Для оправданной интерполяции необходимо соблюдать два условия – репрезентативность данных в точке отбора проб и относительную однородность лимнологических характеристик каждой ячейки акватории, на которую выполняется интерполяция.

Следует отметить, что изучаемые нами показатели характеризовали поверхностный слой воды высотой один метр, характеризующийся наибольшим обилием планктона в условиях холодноводного Онежского озера. С этих позиций все ячейки относительно однородны, что позволяет выполнять для них интерполяцию показателей из соседних ячеек. В нашем случае была выбрана процедура Multilevel B-Spline Interpolation, которая дает гибкое, но полное пространственное распространение показателя (рис. 3). В дальнейшем на основе интерполированных значений для каждой ячейки акватории были рассчитаны интегральные показатели трофности.

Два участка Онежского озера (вершина Лижемской губы и большая часть Повенецкого залива) имели очень малое число точек отбора проб, так как регистрировались не все изучаемые показатели; эти ячейки были исключены из окончательных иллюстраций и на диаграммах обозначены как зона «нет данных».

Программные средства

Использованы следующие программные средства. Для организации баз данных – MS Access, MS Excel; для ведения ГИС – QGIS (<https://qgis.org/ru/site/>), для работы с растрами – SAGA (<http://www.saga-gis.org/>), для статистических расчетов – пакет R (R Core Team, 2012¹). Метод главных компонент и метод диагностических баллов применялся по известным алгоритмам [Коросов, 2007].

¹ R Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, Электронный ресурс: <http://www.R-project.org/> (дата обращения 18.02.2021).

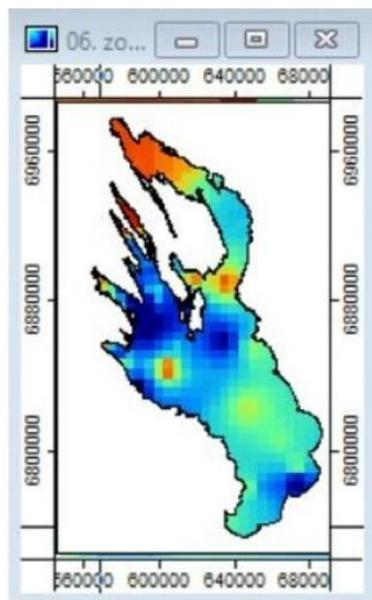


Рис. 3. Интерполяция показателя «численность бактериопланктона» с помощью процедуры Multilevel B-Spline Interpolation; по осям даны координаты в системе WGS84 / UTM (zone 36N)

Fig. 3. The interpolation of the indicator "bacterioplankton number" using the Multilevel B-Spline Interpolation procedure; coordinates are given along the axes in the WGS84 / UTM system (zone 36N)

Количественный анализ (анализ главных компонент)

Все имеющиеся в нашем распоряжении данные выражены в форме чисел и могут быть обработаны количественными методами. Смысл анализа состоит в поиске сопряженного изменения всех четырех показателей на акватории озера, которое может быть интерпретировано как изменение трофности озерных вод. Таким образом, стоит задача дифференциации разных частей акватории по степени выраженности изученных свойств. Если есть возможность придать изучаемым объектам (частям акватории) определенный статус, т.е. априорно разделить их множество на определенные классы, уместно использовать дискриминантный анализ. Когда же изначально дискретные классы задать нельзя, для решения задачи классификации подходит анализ главных компонент. Его суть состоит в том, чтобы на основе имеющихся корреляций между изучаемыми переменными сформировать новые искусственные характеристики, линейные индексы с участием всех переменных, которые выражали бы направления сопряженной изменчивости всех исходных признаков. Для четырех переменных первый индекс примет вид:

$$PC1 = a \times x1 + b \times x2 + c \times x3 + d \times x4;$$

где коэффициенты a, b, c, d – «факторные нагрузки», которые выражают степень корреляции между исходными переменными.

Сами же индексы («главные компоненты»), выражают некие факторы, заставляющие изучаемые переменные сопряженно варьировать. Зачастую содержательную интерпретацию имеет один первый индекс (первая главная компонента).

Существенным моментом является разделение совокупности исходных данных на две группы. Одна группа образована данными по всем четырем показателям (бактериопланктон, хлорофилл «а», прозрачность, зоопланктон), собранными на одних и тех же станциях. Их объем составляет 19 записей для периода до 2000 г. и 21 запись – для перио-

да после 2000 г. Эти материалы использованы для анализа связей между переменными. Вторая группа представляет совокупность из 544 значений, собранных по всей акватории озера из центров ячеек пространственной интерполяции показателей. Эти данные использованы для создания карты пространственного распределения первой главной компоненты как интегральной характеристики разных частей акватории.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение зависимостей

Раскрыть содержание главных компонент еще до выполнения анализа позволяет изучение корреляций между переменными (табл. 2). Прозрачность имеет высокую отрицательную корреляцию со всеми прочими компонентами, которые связаны положительными связями, но разной силы. Наиболее отчетливо и сильно коррелирует пара хлорофилл-зоопланктон, бактериопланктон связан с ними менее определенно в разные периоды.

Табл. 2. Коэффициенты корреляции между изучаемыми показателями за период 1982–2000 гг. (верхняя правая часть) и период 2000–2020 гг. (нижняя левая часть)

Table 2. Correlation coefficients between the studied indicators for the period 1982–2000 (upper right part) and the period 2000–2020 (lower left part)

Показатели	Численность бактериопланктона	Хлорофилл «а»	Прозрачность	Биомасса зоопланктона
Численность бактериопланктона	1,00	0,15	-0,47	0,45
Хлорофилл «а»	0,04	1,00	-0,55	0,39
Прозрачность	-0,25	-0,31	1,00	-0,84
Биомасса зоопланктона	0,05	0,49	-0,53	1,00

Примечание:

жирным шрифтом выделены достоверные ($p < 0,05$) коэффициенты корреляции.

Анализ главных компонент также в качестве лидирующей взаимно коррелирующей группы выделил показатели прозрачности, зоопланктона и хлорофилла, а бактериопланктон обрел более высокую нагрузку во второй компоненте (табл. 3). Структура связей между показателями сохраняется примерно одинаковой для обоих изучаемых периодов (рис. 4). Прозрачность противопоставлена зоопланктону, хлорофиллу и бактериопланктону, который, однако, несколько отстоит от прямого противостояния. Распределение дисперсий главных компонент похоже: первая забирает примерно 45 % общей дисперсии, вторая – 30 %.

На основании найденных оценок факторных нагрузок были рассчитаны значения главных компонент для всех 544 ячеек акватории Онежского озера (рис. 5). Картина пространственного распределения значений первых компонент в разные периоды, во-первых, выявляет общее – низкий уровень рассматриваемых показателей на большей части района Центральное Онего. С другой стороны, картограммы демонстрируют отличие в распределениях показателей в сравниваемые периоды времени. В прошлом веке в западной части озера изучаемые характеристики имели повышенные значения, в целом, водоем можно было охарактеризовать как более продуктивный, чем он стал в XXI веке.

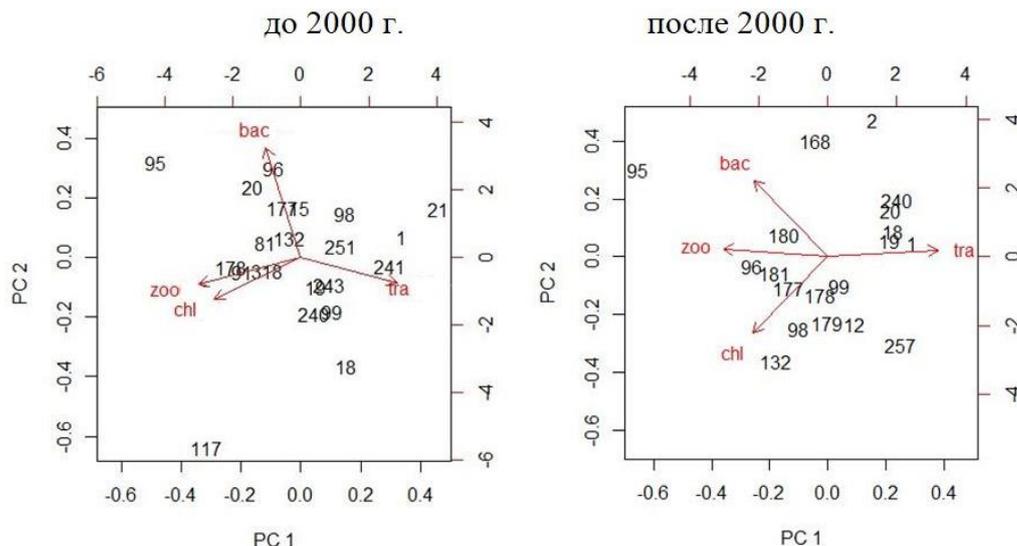


Рис. 4. Биplot по результатам анализа главных компонент (PC1 - первая главная компонента; PC2 - вторая главная компонента; bac – численность бактериопланктона, chl – хлорофилл «а», tra – прозрачность воды, zoo – биомасса зоопланктона)

Fig. 4. Biplot by the results of principal component analysis (PC1 – the first principal component; PC2 is the second principal component; bac - bacterioplankton number, chl - chlorophyll «a», tra - water transparency, zoo - zooplankton biomass)

Табл. 3. Факторные нагрузки в первой и второй главных компонентах для показателей в изучаемые периоды

Table 3. Factor loadings in the first and second principal components for indicators in the studied periods

Показатель	1982–2000 гг.		2000–2020 гг.	
	Первая компонента	Вторая компонента	Первая компонента	Вторая компонента
Численность бактериопланктона	-0,21	0,89	-0,40	0,71
Хлорофилл «а»	-0,51	-0,34	-0,41	-0,70
Прозрачность	0,57	-0,21	0,60	-0,27
Биомасса зоопланктона	-0,61	-0,22	-0,57	0,53

Очевидная причина – высокая антропогенная нагрузка, связанная с работой промышленных предприятий Петрозаводска и Кондопоги, коммунальные сточные воды этих городов, стоки удобрений с сельскохозяйственных угодий. В конце 20 века произошел спад промышленного производства, деградация сельского хозяйства, улучшение очистки сточных вод, что привело к существенному снижению антропогенной нагрузки и, как следствие, к снижению уровня изучаемых показателей, росту прозрачности воды. Однако в локальных областях – в Петрозаводской и Кондопожской губе экологическая ситуация не улучшилась, а напротив, усугубилась. На картограмме (рис. 5) отчетливо видно повышение значений первой компоненты в 2000–2020 гг., что отражает совместный рост показателей зоопланктона и хлорофилла «а» и снижение прозрачности воды. При внешней наглядности результатов компонентного анализа, за ней скрываются три содержательных

аспекта, усложняющих интерпретацию картограмм. Во-первых, значения компонент носят относительный характер и поэтому их нельзя сопоставлять напрямую на картограммах для разных периодов. Высокие значения компоненты за первый период времени могут соответствовать высоким значениям показателей, а такие же значения для второго периода – средним уровням показателей; компоненты отображают только относительный размах значений признаков.

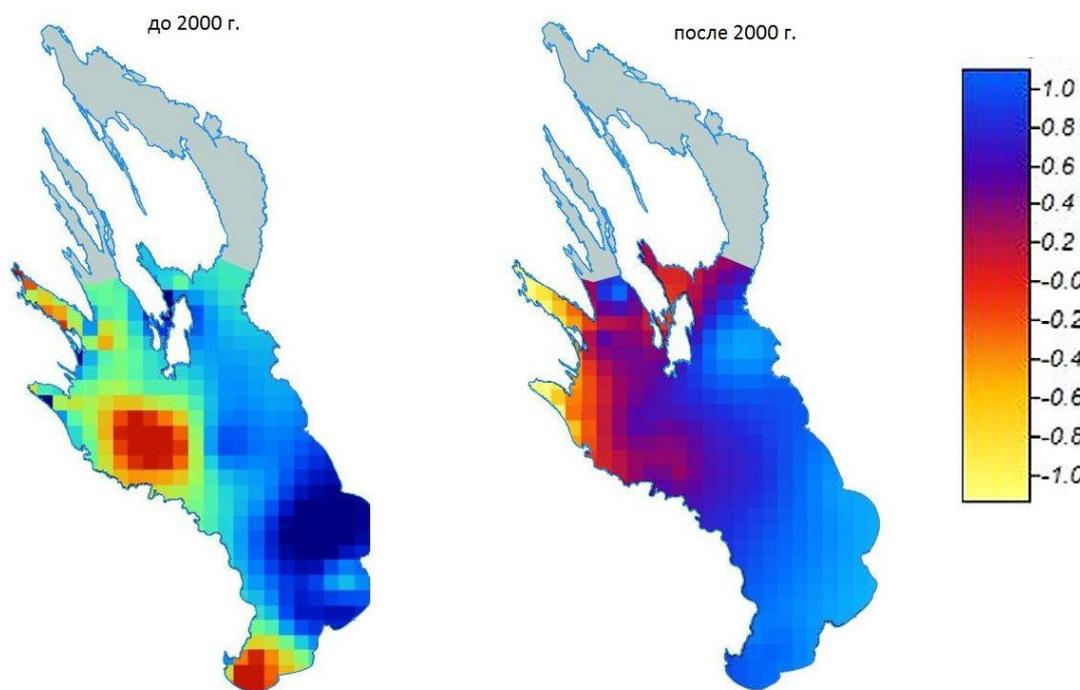


Рис. 5. Картограммы распределения значений первой главной компоненты по акватории Онежского озера (серая зона – нет данных)

Fig. 5. Cartograms of the first principle component distribution over Lake Onega area (gray zone – no data)

Во-вторых, полученные компоненты дают основания говорить о трендах, но они не позволяют непосредственно с картограммы получить критические значения; требуется специальное исследование таких уровней. Третья проблема состоит в том, что главная компонента рассчитывается, исходя из степени корреляции между исходными показателями, основанной на метрике взаимной сопряженности и сильно зависящей от состава конкретной выборки. В разных выборках направления изменчивости (и факторные нагрузки) неизбежно отличаются. Следовательно, казалось бы, однотипные главные компоненты все же имеют разное содержание для двух изученных периодов времени.

Таким образом, при всей наглядности анализ главных компонент дает довольно неопределенные результаты. Необходимо так унифицировать технологию, чтобы: а) для сравниваемых объектов был введен общий критерий их «трофности»; б) метрика учитывала бы не количественную зависимость между переменными, но соответствие их значений априорным «нормальным» и «отклоняющимся» значениям. В этом случае объекты (картограммы) могут непосредственно сопоставляться для выявления отличий и приводить к однозначным выводам.

Названными свойствами обладает экспертная система, привлекающая в свой аппарат внешние (часто неформализованные) идеи для формирования критериев оценки «трофности» объекта исследований по каждому из изучаемых компонентов.

Экспертная система (метод диагностических баллов)

Цель экспертной системы состоит в вовлечении вербальных, неформализованных, качественных, размытых, оценочных суждений экспертов в строгий количественный, формализованный анализ всей имеющейся информации. В одних случаях суждения экспертов могут носить строгий дискретный характер, когда совокупность изучаемых объектов можно априорно разбить на два или несколько классов и затем выявлять их специфику с помощью строгих многомерных методов (таких как дискриминантный, канонический анализ и пр.). В других случаях эксперты могут указать только некие границы значений изучаемых характеристик, которые соответствуют тому или иному статусу объектов исследования. Зачастую эти границы для разных классов объектов перекрываются, и в зону неопределенности попадает немало объектов неопределенного статуса. Именно такова ситуация с распределением вод по классам трофности.

Выходом из этой ситуации является исследование нескольких показателей, каждый из которых в состоянии вносить свой вклад в уточнение статуса данного объекта. Среди технологий объективизации вербальных знаний следует назвать метод нечеткой логики, логистической регрессии и байесовскую классификацию [Менишуткин и др., 2009а, 2009б]. В нашей работе мы использовали метод, основанный на классификаторе Байеса в форме диагностических таблиц, применяемых в медицине [Гублер, Генкин, 1973]. Цель анализа состоит в оценке трофности всех частей акватории Онежского озера. Поскольку по общепринятым шкалам [Винберг, 1960; Кумаев, 1984; Carlson, 1977], экосистема Онежского озера соответствует низкому уровню трофии (олиготрофная, а в отдельных частях – мезотрофная), то в этих пределах были назначены два класса величин, достаточных для оценочного выявления и динамики «горячих» точек на акватории Онежского озера. Первый класс был назван «низкая трофность», второй класс – «высокая трофность» именно для условий Онежского озера.

Смысл метода состоит в том, чтобы на основе имеющейся априорной информации (в форме распределения исходных признаков) определить сначала вероятность для каждого i -го интервала распределения принадлежности к первому (p_{1i}) или второму (p_{2i}) заданному классу, а затем определить шансы значения из данного интервала быть отнесенным к первому или второму классу. Шансы определяются как отношения вероятностей. Для удобства использования шансы переводят в форму десятичных логарифмов и умножают на 5; тогда они приобретают целочисленные значения и становятся «диагностическими баллами»:

$$d_i = 5 \times \lg (p_{1i} / p_{2i});$$

где d_i – диагностический балл;
 p_{1i} – вероятность принадлежности к первому классу;
 p_{2i} – вероятность принадлежности ко второму классу.

Диагностика соответствия объекта (в нашем случае – это ячейки акватории размером 5×5 км) первому или второму классу трофности состоит в последовательном определении диагностического балла по каждому показателю и суммировании этих баллов для каждого объекта.

Существенным моментом оказывается возможность точно задать уровень значимости соответствия конкретного объекта данному классу. Приняв уровень значимости, равным 0.05, задаем вероятность отклонить гипотезу «объект не принадлежит к классу 1» как 0.95 и вероятность принять гипотезу «объект принадлежит к классу 1» как 0,05 и находим критический диагностический балл:

$$d_{кр1} = 5 * \lg(0,95 / 0,55) = 5 * 1,9 = 9,5 \approx 10.$$

Если сумма четырех диагностических баллов для каждого показателя превышает этот порог, значит, с вероятностью $p = 0,95$ объект относится к классу 1. Альтернативная гипотеза о принадлежности объекта к классу 2 дает диагностический балл, равный -6 . Значения $d_{кр}$ между -6 и 6 не позволяют диагностировать состояние объекта, хотя и могут характеризовать степень близости объекта к тому или иному классу.

Критерии классов трофности

Выявленные предыдущими исследованиями участки озера с повышенной биогенной нагрузкой [Экосистема..., 1990; Онежское..., 1999; Крупнейшие..., 2015], а также обобщение собственных результатов позволили нам разработать для условий Онежского озера количественные критерии отнесения его вод к классу низкой трофности или классу высокой трофности (табл. 4).

Табл. 4. Количественные критерии низкой и высокой трофности Онежского озера по изучаемым показателям

Table 4. Quantitative criteria of low and high trophic conditions of Lake Onego according to the studied indicators

Показатель	Категория	
	Низкая трофность	Высокая трофность
Численность бактериопланктона, КОЕ/мл	от 0 до 800	от 300 до 24000
Хлорофилл «а», мкг/л	от 0 до 8	от 4,1 до 25
Прозрачность воды, м	от 2,5 до 6	от 1 до 3.5
Биомасса зоопланктона, мг/куб. м	от 0 до 1000	от 200 и выше

Поскольку границы этих классов пересекаются, распределения изучаемых показателей имеют некоторую зону трансгрессии (рис. 6). Тем не менее, в этих зонах вероятности принадлежности к первому или второму классу трофности различаются. Эти различия вероятностей, выраженные через диагностические баллы (табл. 5), даже в пределах зон трансгрессии также могут способствовать правильной классификации проб из конкретных частей акватории (рис. 6).

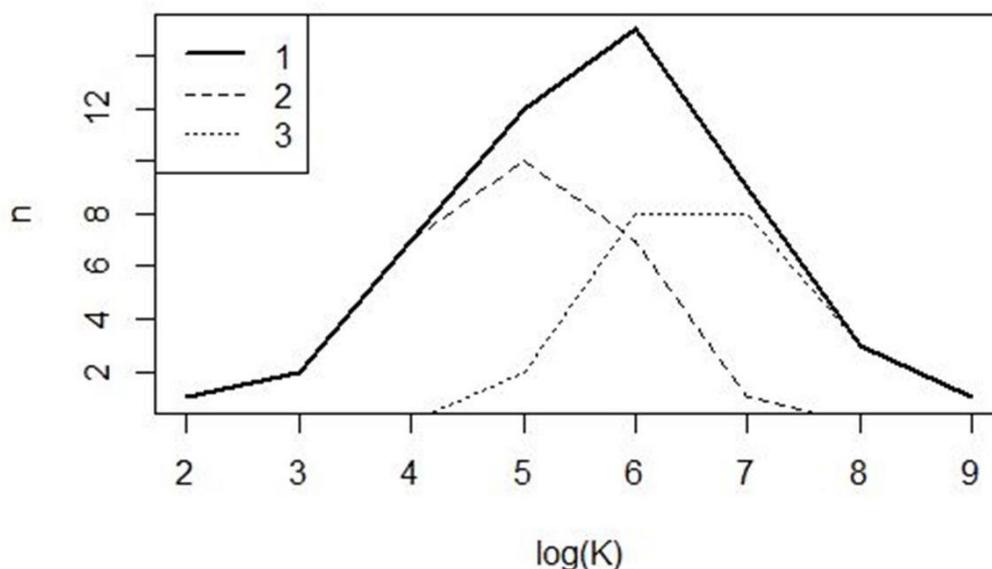


Рис. 6. Подразделение общего распределения численности бактериопланктона (1) на два класса, соответствующих низкой (2) и высокой (3) трофности Онежского озера; по оси абсцисс – логарифмированные значения численности бактериопланктона, $\log(K)$, по оси ординат – частота

Fig. 6. Division of the total distribution of bacterioplankton number (1) into two classes corresponding to low (2) and high (3) trophic conditions of Lake Onego; on the abscissa axis – logarithmic values of bacterioplankton number, $\log(K)$, on the ordinate axis – frequency

Табл. 5. Диагностические баллы для класса «низкая трофность», назначенные для разных значений четырех показателей (заданные логарифмами показатели)

Table 5. Diagnostic points for the "low trophic conditions" class, assigned for different values of the four indicators (logarithmic indicators)

Численность бактериопланктона	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
балл	10	10	6	9	3	-1	-5	-13	-13	-13
Хлорофилл «а»	-1,5	-1,0	-0,5	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
балл	14	14	14	14	14	3	-3	-4	-12	-12
Прозрачность	-1,5	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
балл	-13	-13	-13	-5	4	13	13	13	13	13
Биомасса зоопланктона	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
балл	13	13	13	13	4	-1	-4	-13	-13	-13

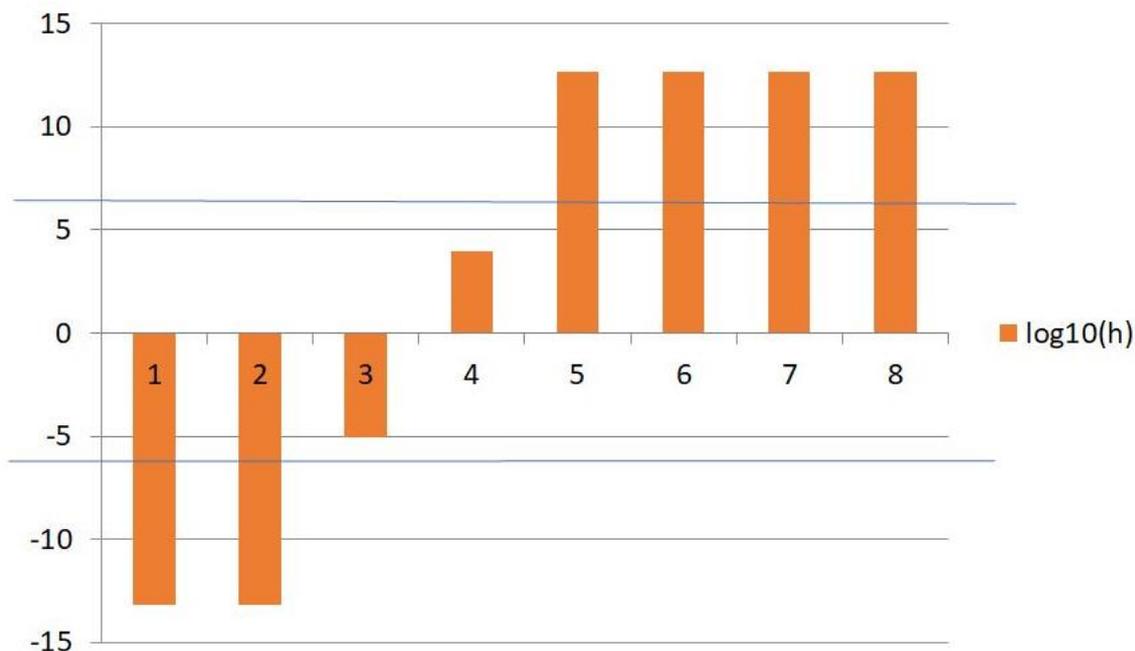


Рис. 7. Баллы класса «низкая трофность» для показателя прозрачности, даны логарифмы $\lg(h)$; горизонтальные линии – критические значения баллов 6 и -6 ($p = 0,05$)

Fig. 7. Points of the "low trophic conditions" class for the transparency indicator, logarithms $\lg(h)$ are given; the horizontal lines are the critical values of points 6 and -6 ($p = 0,05$)

Классификация ячеек акватории по трофности

Определение балла трофности для каждой ячейки по каждому показателю отдельно и в сумме привело к построению картограммы распределения зон трофности Онежского озера (рис. 8).

Полученная картина во многом аналогична той, что дает анализ главных компонент. Основная часть района Центральное Онего характеризуется низкой трофностью воды. В то же время хорошо видно, что в Кондопожской губе расширилась площадь с повышенной трофностью и увеличились переходные зоны между первым и вторым классом трофности вдоль западного берега Кондопожской губы. Воды Петрозаводской губы по-прежнему характеризуются более высокой трофностью, чем район Центральное Онего.

В отличие от анализа главных компонент, картограммы, построенные на основании метода диагностических баллов, непосредственно передают оценки состояния среды по критериям, заранее введенным в анализ. Эти картограммы проще, понятнее и отражают статистически обоснованное подразделение объектов. Тем не менее, результат такого построения непосредственно определяется принятыми пороговыми значениями, и любое изменение критических порогов неизбежно изменит результирующую картину. В нашем исследовании критерии разрабатывались и принимались один раз задолго до построения первичных картограмм, что и определило результат. Таким образом, анализ данных в рамках экспертной системы предъявляет особенно высокие требования к критическим границам, заостряет на них внимание исследователей. Безусловно, эти значения могут быть уточнены, и в будущем, вероятно, претерпят изменения (или дробление) и позволят построить более точные картограммы трофности онежских вод.

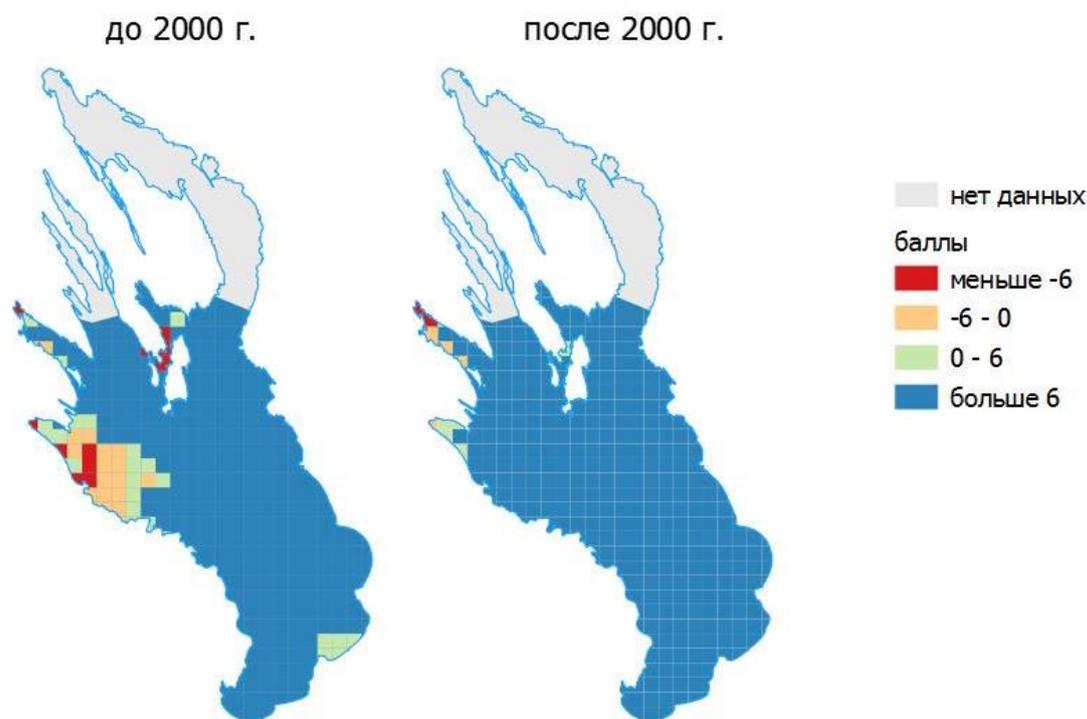


Рис. 8. Картограммы распределения зон трофности в Онежском озере: высокая трофность (баллы меньше 6), низкая трофность (баллы больше 6), промежуточные (баллы от -6 до 6)

Fig. 8. Cartograms of the distribution of trophic conditions zones in Lake Onego: high trophic conditions (points less than 6), low trophic conditions (points more than 6), intermediate (points between -6 to 6)

ВЫВОДЫ

Для условий в целом низкого уровня трофии Онежского озера разработана более детальная классификация отдельных частей его акватории по уровню трофности. Применялись методы многомерного статистического анализа (анализ главных компонент) и методы классификации на основе формулы Байеса (диагностические баллы). Показано, что анализ главных компонент эффективно позволяет выполнять классификацию частей акватории, однако затруднено содержательное сравнение полученных картограмм. Примененный метод диагностических баллов позволил дать картину, доступную непосредственной интерпретации. По результатам классификации ячеек акватории Онежского озера были выделены зоны низкой трофности, высокой трофности, а также переходные зоны. Показано, что воды Петрозаводской и Кондопожской губ не могут быть отнесены к акватории с низкой трофностью, к которой отнесен практически весь район Центральное Онего. Сравнение двух двадцатилетних периодов – до и после 2000 г. – показывает, что трофность вод района Центральное Онего в целом стала ниже, а в Кондопожской губы – возросла.

Выполненное исследование вскрыло ряд вопросов, требующих своего решения и развития. В их числе – реорганизация баз данных, их унификация и расширение, тщательный выбор мест отбора проб с целью повышения репрезентативности собираемых данных, планирование специальных исследований по установлению критических границ для классификации вод (озерных биоценозов) по трофности, расширение спектра диагностических показателей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was conducted in accordance with a state assignment given to the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Northern Water Problems Institute, KRC, RAS).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алимов А.Ф.* Введение в продукционную гидробиологию. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 152 с.
2. *Алимов А.Ф., Богатов В.В., Голубков С.М.* Продукционная гидробиология. СПб.: Наука, 2013. 343 с.
3. *Андроникова И.Н.* Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.
4. *Бульон В.В.* Зависимость рыбопродуктивности водоемов от первичной продукции. Методы изучения состояния кормовой базы рыбохозяйственных водоемов. Сборник научных трудов. Вып. 196. Л.: ГосНИОРХ, 1983. С. 3–11.
5. *Винберг Г.Г.* Первичная продукция водоемов. Минск: АН БССР, 1960. 329 с.
6. *Гублер Е.В., Генкин А.А.* Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. Л.: Медицина, 1973. 144 с.
7. *Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России.* Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 255 с.
8. *Калинкина Н.М., Коросов А.В., Белкина Н.А., Теканова Е.В., Сярки М.Т., Коросов А.А.* Географическая информационная система «Биоресурсы Онежского озера». ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. Т. 24. Ч. 2. С. 362–370. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-362-370.
9. *Китаев С.П.* Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
10. *Коросов А.В.* Специальные методы биометрии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 364 с.
11. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 375 с.
12. *Мениуткин В.В., Филатов Н.Н., Потахин М.С.* Экспертная система «Озера Карелии». 1. Порядковые и номинальные характеристики озер. Водные ресурсы, 2009а. Т. 36. № 2. С. 160–171.
13. *Мениуткин В.В., Филатов Н.Н., Потахин М.С.* Экспертная система «Озера Карелии». 2. Классификация озер. Водные ресурсы, 2009б. Т. 36. № 3. С. 300–311.
14. *Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.Г.* Комплексная экологическая классификация поверхностных вод суши. Гидробиологический журнал, 1993. Т. 29. №4. С. 62–76.
15. Онежское озеро. Атлас. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с.
16. Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. 293 с.

17. *Тимакова Т.М., Куликова Т.П., Литвинова И.А., Полякова Т.Н., Сярки М.Т., Теканова Е.В., Чекрыжева Т.А.* Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината. Водные ресурсы, 2014. Т. 41. № 1. С. 74–82. DOI: 10.7868/S032105961401012X.
18. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. 264 с.
19. *Carlson R.E.* A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977. V. 22. P. 361–369.
20. *Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A.* What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? *Journal of Great Lakes Research*, 2020. V. 46. Iss. 4. P. 850–861. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.02.008>.
21. *Rukhovets L.A., Filatov N.N.* Ladoga and Onego – great European Lakes. Observations and Modeling. Chichester, UK: Springer-Verlag, 2010. 308 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68145-8.

REFERENCES

1. *Alimov A.F.* Introduction to Production Hydrobiology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 152 p. (in Russian).
2. *Alimov A.F., Bogatov V.V., Golubkov S.M.* Production hydrobiology. St. Petersburg: Nauka, 2013. 343 p. (in Russian).
3. *Andronikova I.N.* Structural and functional organization of zooplankton in lake ecosystems of different trophic types. St. Petersburg: Nauka, 1996. 189 p. (in Russian).
4. *Boulion V.V.* Dependence of fish productivity of reservoirs on primary production. Methods for studying the state of the fodder base of fishery reservoirs. Collection of scientific papers. Issue 196. Leningrad: GosNIORKH, 1983. P. 3–11 (in Russian).
5. *Carlson R.E.* A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977. V. 22. P. 361–369.
6. Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems great lakes of Russia. Petrozavodsk: KRC RAS, 2020. 255 p. (in Russian, abs English).
7. Ecosystem of Lake Onego and tendencies of its change. Leningrad: Nauka, 1990. 264 p. (in Russian).
8. *Gubler E.V., Genkin A.A.* Application of nonparametric criteria of statistics in biomedical research. Leningrad: Medicina, 1973. 144 p. (in Russian).
9. *Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A.* What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? *Journal of Great Lakes Research*, 2020. V. 46. Iss. 4. P. 850–861. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.02.008>
10. *Kalinkina N.M., Korosov A.V., Belkina N.A., Tekanova E.V., Syarki M.T., Korosov A.A.* Geographic information system "Bioresources of Lake Onego". InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Petrozavodsk: KRC RAS, 2018. V. 24. Part 2. P. 362–370. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-362-370 (in Russian, abs English).
11. *Kitaev S.P.* Ecological bases of biological productivity of lakes in different natural zones. Moscow: Nauka, 1984. 207 p. (in Russian).
12. *Korosov A.V.* Special methods of biometrics. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2007. 364 p. (in Russian).
13. Lake Onego. Atlas. Petrozavodsk: KRC RAS, 2010. 151 p. (in Russian).
14. Lake Onego. Ecological problems. Petrozavodsk: KRC RAS, 1999. 293 p. (in Russian, abs English).

15. *Menshutkin V.V., Filatov N.N., Potakhin M.S.* Expert system "Lakes of Karelia". 1. Ordinal and nominal characteristics of lakes. *Water Resources*, 2009a. V. 36. No 2. P. 160–171 (in Russian).
 16. *Menshutkin V.V., Filatov N.N., Potakhin M.S.* Expert system "Lakes of Karelia". 2. Classification of lakes. *Water Resources*, 2009b. V. 36. No 3. P. 300–311 (in Russian).
 17. *Oksiyuk O.P., Zhukinskiy V.N., Braginskiy L.P., Linnik P.N., Kuzmenko M.I., Klenus V.G.* Integrated ecological classification of land surface waters. *Hydrobiological journal*, 1993. V. 29. No 4. P. 62–76 (in Russian).
 18. *Rukhovets L.A., Filatov N.N.* Ladoga and Onego – great European Lakes. Observations and Modeling. Chichester, UK: Springer-Verlag, 2010. 308 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68145-8.
 19. The largest lakes-reservoirs of the north-west European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KRC RAS, 2015. 375 p. (in Russian, abs English).
 20. *Timakova T.M., Kulikova T.P., Litvinova I.A., Polyakova T.N., Syarki M.T., Tekanova E.V., Chekryzheva T.A.* Changes in biocenoses of Kondopozhskaya Bay of Lake Onego under the influence of waste water from a pulp and paper mill. *Water Resources*, 2014. V. 41. No 1. P. 74–82. DOI: 10.7868/S032105961401012X (in Russian).
 21. *Vinberg G.G.* Primary production of reservoirs. Minsk: Academy of Sciences of the BSSR, 1960. 329 p. (in Russian).
-