

УДК: 574.55(282.247.211)

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-259-273

Н. М. Калинкина¹, Е. В. Теканова², А. В. Коросов³, М. Т. Сярки⁴, Е. М. Макарова⁵,
К. В. Исакова⁶

ОПЫТ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ОЦЕНОК ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ НА АКВАТОРИЮ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

АННОТАЦИЯ

Использованы ГИС-технологии для изучения пространственного распределения продукции фитопланктона на акватории оз. Онежского. Основой для построения карт послужили эмпирические гидробиологические данные за 1982–2023 гг. Для оценки влияния изменений климата и антропогенной нагрузки на продуктивность водоема рассмотрены два периода — до и после 2000 г. В качестве показателя продуктивности озера использовали инструментально измеренные величины фотосинтеза. Для прогноза уровня первичной продукции использовали эмпирические показатели сапрофитного бактериопланктона, биомассу рачкового зоопланктона, концентрацию хлорофилла *a* и прозрачность воды. Для этого подобрали и рассчитали оптимальную нейросетевую модель (однослойный персептрон из 4 нейронов), имеющую низкие и равные стандартные ошибки для обучающей и проверочной выборок. Для прогноза уровня первичной продукции на всей акватории оз. Онежского построили сеть из 142 точек, покрывающих всю акваторию озера. В каждую ячейку внесли значения четырех изучаемых показателей, полученных методом пространственной интерполяции с использованием треугольной сглаживающей функции. Используя сеть точек, рассчитали величины продукции в каждой из них. Полученные картограммы наглядно отражают основные тренды пространственного и временного распределения первичной продукции по акватории оз. Онежского. Центральная часть акватории оз. Онежского характеризуется низкой продуктивностью. В заливах, на побережье которых расположены крупные промышленные центры (г. Петрозаводск и г. Кондопога) отмечается повышенная продуктивность, связанная с активным загрязнением онежских вод. В последние десятилетия продуктивность экосистемы Петрозаводской губы стала ниже, а Кондопожской губы — возросла, видимо, в результате наращивания мощности товарного производства садковой форели.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Онежское озеро, продуктивность, ГИС, нейронные сети, экстраполяция

- ¹ Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», пр-т А. Невского, д. 50, Петрозаводск, Россия, 185030, *e-mail*: cerioda@mail.ru
- ² Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», пр-т А. Невского, д. 50, Петрозаводск, Россия, 185030, *e-mail*: etekanova@mail.ru
- ³ Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», пр-т А. Невского, д. 50, Петрозаводск, Россия, 185030; Петрозаводский государственный университет, пр-т Ленина, д. 30, Петрозаводск, Россия, 185035, *e-mail*: korosov@mail.ru
- ⁴ Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», пр-т А. Невского, д. 50, Петрозаводск, Россия, 185030, *e-mail*: msyarki@mail.ru
- ⁵ Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», пр-т А. Невского, д. 50, Петрозаводск, Россия, 185030, *e-mail*: emm777@bk.ru
- ⁶ Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», пр-т А. Невского, д. 50, Петрозаводск, Россия, 185030, *e-mail*: ksusha_isakova@mail.ru

**Natalia M. Kalinkina¹, Elena V. Tekanova², Andrey V. Korosov³, Maria T. Syarki⁴,
Elena M. Makarova⁵, Ksenia V. Isakova⁶**

THE EXPERIENCE OF EXTRAPOLATING PRODUCTIVITY ESTIMATES FOR THE WATER AREA OF LAKE ONEGO

ABSTRACT

GIS technologies were used to study the spatial distribution of phytoplankton production in the water area of Lake Onego. Empirical hydrobiological data for 1982–2023 were the basis for the map development. Two periods, before and after 2000, were considered separately to assess the impact of climate change and anthropogenic load on the productivity of the reservoir. Empirical values of the number of saprophytic bacterioplankton, concentration of chlorophyll *a*, and water transparency were used to predict the level of primary production. To do this, we selected and calculated the optimal neural network model (a single-layer perceptron of 4 neurons), which has low and equal standard errors for training and test samples. A network of 142 points, covering the entire water area of Lake Onego was built to predict the level of primary production. Each cell contains the values of the four studied indicators, obtained by the method of spatial interpolation using a triangular smoothing function. The primary production values were calculated at each of the 142 points. The resulting cartograms clearly reflect the main trends in the territorial and temporal distribution of primary production in the water area of Lake Onego. The central part of the water area of Lake Onego is characterized by low productivity. Increased productivity is observed in bays on the coast of which large industrial centers are located (Petrozavodsk and Kondopoga), which is associated with the active pollution of these waters. In recent decades, the productivity of the Petrozavodskaya Bay ecosystem has decreased, while the productivity of the Kondopozhskaya Bay has increased, apparently as a result of the increase in commercial trout production capacity.

KEYWORDS: Lake Onego, lake productivity, GIS, neural network, extrapolation

ВВЕДЕНИЕ

С началом XXI в. большое влияние на природу России оказывает не только интенсификация хозяйственной деятельности, но и потепление климата [Третий оценочный доклад..., 2022; Государственный доклад..., 2024]. Типичной реакцией водной экосистемы на увеличение биогенной нагрузки является возрастание уровня продуктивности экосистемы и, в конечном итоге, ее эвтрофирование [Алимов, 1989; *Henderson-Sellers, Makland*, 1987; *Eutrophication: causes...*, 2011]. Этот процесс сопровождается ухудшением качества воды, в т. ч. заморными явлениями и «цветением» токсичных цианобактерий [*Eutrophica-*

¹ Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 50, Aleksandra Nevskogo ave., Petrozavodsk, 185030, Russia, *e-mail: cerioda@mail.ru*

² Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 50, Aleksandra Nevskogo ave., Petrozavodsk, 185030, Russia, *e-mail: etekanova@mail.ru*

³ Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 50, Aleksandra Nevskogo ave., Petrozavodsk, 185030, Russia; Petrozavodsk State University, 30, Lenina ave., Petrozavodsk, 185030, Russia, *e-mail: korosov@mail.ru*

⁴ Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 50, Aleksandra Nevskogo ave., Petrozavodsk, 185030, Russia, *e-mail: msyarki@mail.ru*

⁵ Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 50, Aleksandra Nevskogo ave., Petrozavodsk, 185030, Russia, *e-mail: emm777@bk.ru*

⁶ Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 50, Aleksandra Nevskogo ave., Petrozavodsk, 185030, Russia, *e-mail: ksusha_isakova@mail.ru*

tion: causes..., 2011; Cyanotoxins: occurrence, causes..., 2012; *Chorus et al.*, 2021]. Последствия совместного влияния антропогенной нагрузки и потепления климата (увеличение температуры воды, изменение объема и химического состава речного стока) для водных экосистем, особенно глубоких озер со сложным термогидродинамическим режимом, до сих пор труднопредсказуемы [*Magnuson et al.*, 1997; *Stich, Brinker*, 2010; *Schwefel et al.*, 2019].

Базовой характеристикой биопродуктивности водной экосистемы служит ее первичная продукция, в частности, в больших глубоких озерах — продукция фитопланктона [*Винберг*, 1960; *Бульон*, 1983; *Китаев*, 1984; *Алимов*, 1989]. Мы неоднократно обращались к проблеме оценки продуктивности в оз. Онежском с разных позиций и используя разные методики для ее косвенной оценки и прогнозирования [*Калинкина и др.*, 2018; 2019; *Коросов и др.*, 2021]. Онежское озеро — глубоководный олиготрофный водоем. Основная антропогенная нагрузка на озеро определяется прошедшими биологическую очистку коммунально-промышленными сточными водами двух крупных промышленных центров, которые поступают в большие глубокие северо-западные заливы — Петрозаводскую губу (г. Петрозаводск) и Кондопожскую губу (г. Кондопога и Кондопожский ЦБК — целлюлозно-бумажный комбинат) [*Крупнейшие озера...*, 2015]. Кроме того, в Кондопожской губе в последние 20 лет активно развивается товарное садковое форелеводство [*Калинкина и др.*, 2017]. В результате хозяйственной деятельности происходит загрязнение водоема, главным образом биогенными и органическими веществами [*Sabylina*, 2010].

Как выяснилось, основная проблема экологической характеристики оз. Онежского, водоема с огромной площадью, состоит в крайней неравномерности расположения станций и периодичности сбора гидробиологических проб. Это требует постоянного поиска более адекватных технологий пространственной экстраполяции оценок по акватории озера. Кроме этого, явно назрел переход от косвенных оценок продуктивности к прямым, инструментальным.

Цель работы состоит в оценке уровня продуктивности всей акватории Онежского озера по показателю первичной продукции с использованием нейронных сетей и пространственной интерполяции.

Одно из направлений разработок состояло в апробации разнообразных методов изучения зависимостей и количественного прогноза; нами были апробированы множественная регрессия, многомерная статистика, байесовский классификатор, процедуры нечеткой логики. Пришло время применения нейронных сетей, преимущество которых состоит в возможности учитывать сложные нелинейные зависимости.

Еще одно новшество, использованное в данной работе, состоит в том, что весь картографический анализ выполнен с помощью пакета terra программы R. Эта среда позволяет анализировать как пространственные, так и атрибутивные отношения объектов без необходимости обращения к специализированным ГИС и связанных с этим операций конвертации данных, существенно замедлявших анализ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данных по измерению фотосинтеза фитопланктона в оз. Онежском значительно меньше, чем по другим гидробиологическим показателям, т. к. это достаточно трудоемкая и времязатратная процедура. Тем не менее, к настоящему времени накоплены десятки данных по первичной продукции водоема, полученных разными методами. Параллельно с оценкой первичной продукции велась стандартная гидробиологическая съемка. Известно, что все компоненты экосистемы прямо или косвенно связаны друг с другом функционально [*McCann*, 2011]. Когда все гидробиологические данные были оцифрованы и переведены в формат экспертной системы [*Калинкина и др.*, 2019], появилась возможность количественно

связать показатели первичной продукции с другими показателями состояния водоема и выполнить экстраполяцию на другие временные периоды и районы озера.

Работа основана на материалах лаборатории гидробиологии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН за последние 40 лет — с 1982 по 2023 гг. В расчетах использованы традиционные при изучении водных экосистем показатели: биомасса зоопланктона (z , мг/м³), концентрация хлорофилла a (c , мкг/л), а также количество сапрофитных бактерий (b , КОЕ/мл), прозрачность воды (tr , м) и температура (te , °C) в верхнем слое водной толщи в летний период (июль–август). Выборки содержали собственные данные авторов и сведения из зарегистрированных баз данных Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр РАН»^{1,2,3}.

Измерения фотосинтеза фитопланктона на оз. Онежском выполнялись разными методами — радиоуглеродным (1989–2006 гг.) и кислородным (2007–2023 гг.), которые мало сопоставимы по причине измерения динамики разных веществ — потребления углерода и выделения кислорода микроводорослями [Бульон, 1993]. В работе были использованы натурные данные о первичной продукции, выполненные кислородным методом в 2007–2023 гг.³

Число строк (проб) в базах для разных показателей различалось: b — 476, c — 457, tr — 457, te — 425, z — 251, p — 120. Расчет значений продуктивности планировалось проводить по формуле вида $p \sim b + c + tr + z + te$ с помощью множественной регрессии (функция glm) и нейронной сети (функция $neuralnet$).

В работе использовали значения первичной продукции, возведенные в степень $p^{0,4}$, поскольку при этом их распределение имеет симметричную форму, близкую к нормальному. Показатели количества сапрофитного бактериопланктона и зоопланктона имеют логнормальное распределение, поэтому в анализ были включены логарифмы их значений, чтобы унифицировать показатели изменчивости данных.

В анализе использовались ГИС-слои, построенные ранее в среде QGIS [Калинкина и др., 2019]: линия берега оз. Онежского, точки станций отбора проб (361 станция), точки центроидов сети прямоугольных выделов 8×8 км для интерполяции исходных данных на всю акваторию и экстраполяции оценок продуктивности (142 точки) (рис. 1).

Подготовка и обработка данных осуществлялась в четыре этапа с чередованием процедур интерполяции и экстраполяции.

Вначале был подготовлен общий массив данных как основа для последующей экстраполяции на всю акваторию озера. Для каждой из 142 равномерно распределенных точек сети был составлен список окрестных станций, входящих в окружность радиусом 20 км, и оценка расстояния до каждой из них (s) (рис. 2).

¹ Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. Н. Планктон пелагиали Онежского озера. Свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2015620274, 13.02.2015. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук (ИВПС КарНЦ РАН), 2015

² Сабылина А. В., Теканова Е. В., Калинкина Н. М. Хлорофилл «а» в воде Онежского озера. Свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2018621068, 13.06.2018. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», 2018

³ Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т., Георгиев А. П., Исакова К. В., Толстиков А. В., Здорovenнов Р. Э., Смирнова В. С. Лимнологические показатели состояния Онежского озера и Выгозерского водохранилища: температура воды, концентрация хлорофилла a , продукция фитопланктона. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2023621189, 12.04.2023. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», 2023

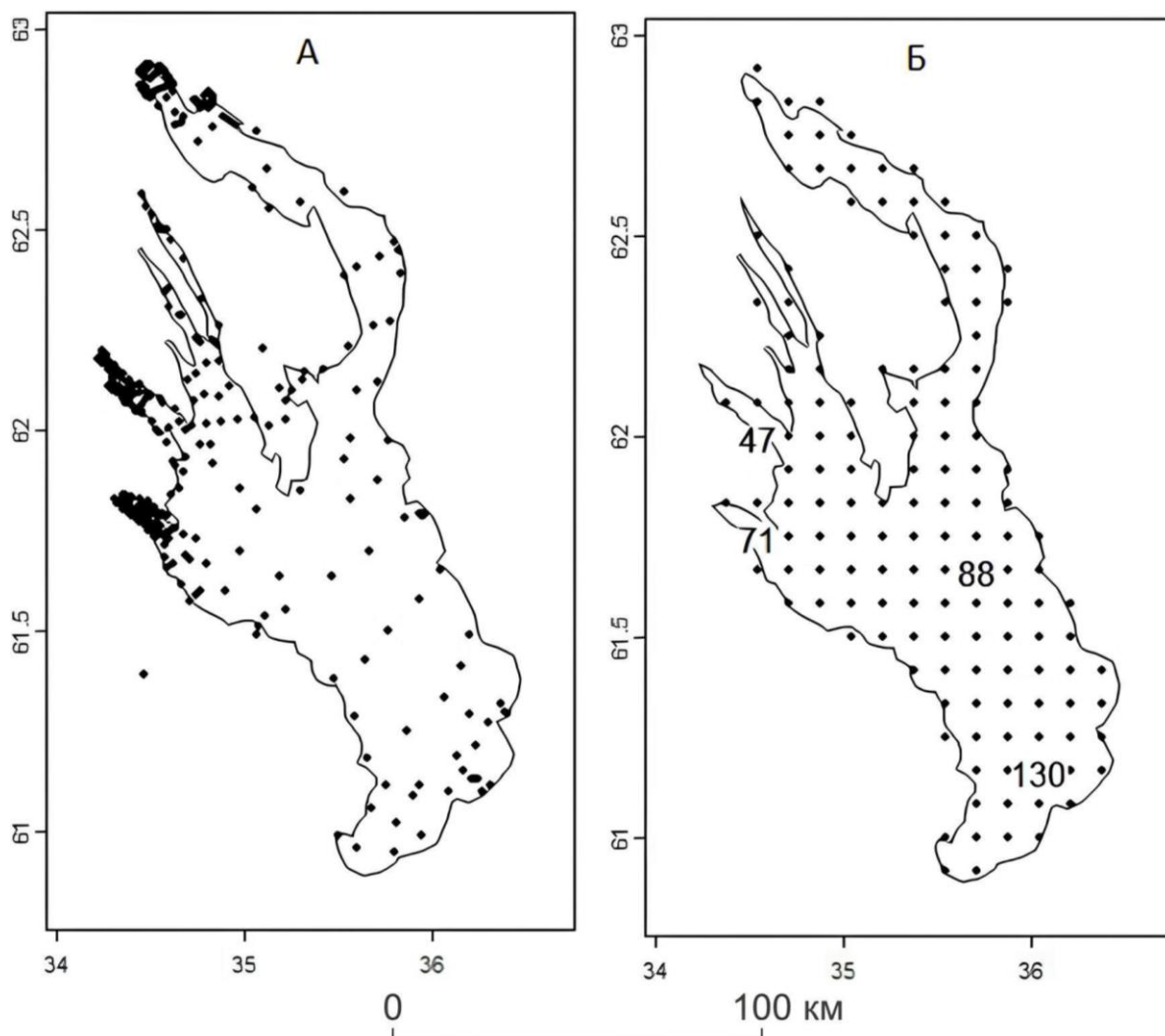


Рис. 1. Расположение 361 станции (А) и 142 точек сети (Б)
на акватории оз. Онежского
Fig. 1. Location of 361 stations (A) and 142 network points (B)
on the water area of Lake Onego

Эти расстояния послужили для расчета «веса» значения показателей с данной станции: $w = (20\,000 - s) / 20\,000$. Максимальное значение ($w = 1$) получала станция, совпадающая с данной точкой сети, минимальное ($w = 0$) — удаленная на 20 000 м и более (треугольная сглаживающая функция). Далее была составлена общая база данных по всем входным переменным (b , c , tr , z , te) для точек сети. Для каждой из 142 точек значение переменной определялось в процедуре взвешенного усреднения значений с окрестных станций (интерполяция) — значение характеристики x умножалось на вес w и делилось на сумму весов (число станций в выборках различалось): $(\sum x * w) / \sum w$. Так сформировался массив (таблица) из 142 строк (точек) и 4 полей (показателей). Этот метод позволил получить оценки почти для всех точек сети акватории, которые оказались достаточно выровненными без резких перепадов, но в то же время сохранили специфику района. Всего было построено две таблицы для двух периодов — с 1982 по 2000 гг. и с 2000 по 2023 гг. К сожалению, для небольшой части точек не удалось подобрать значения всех переменных; такие точки выпали из анализа.

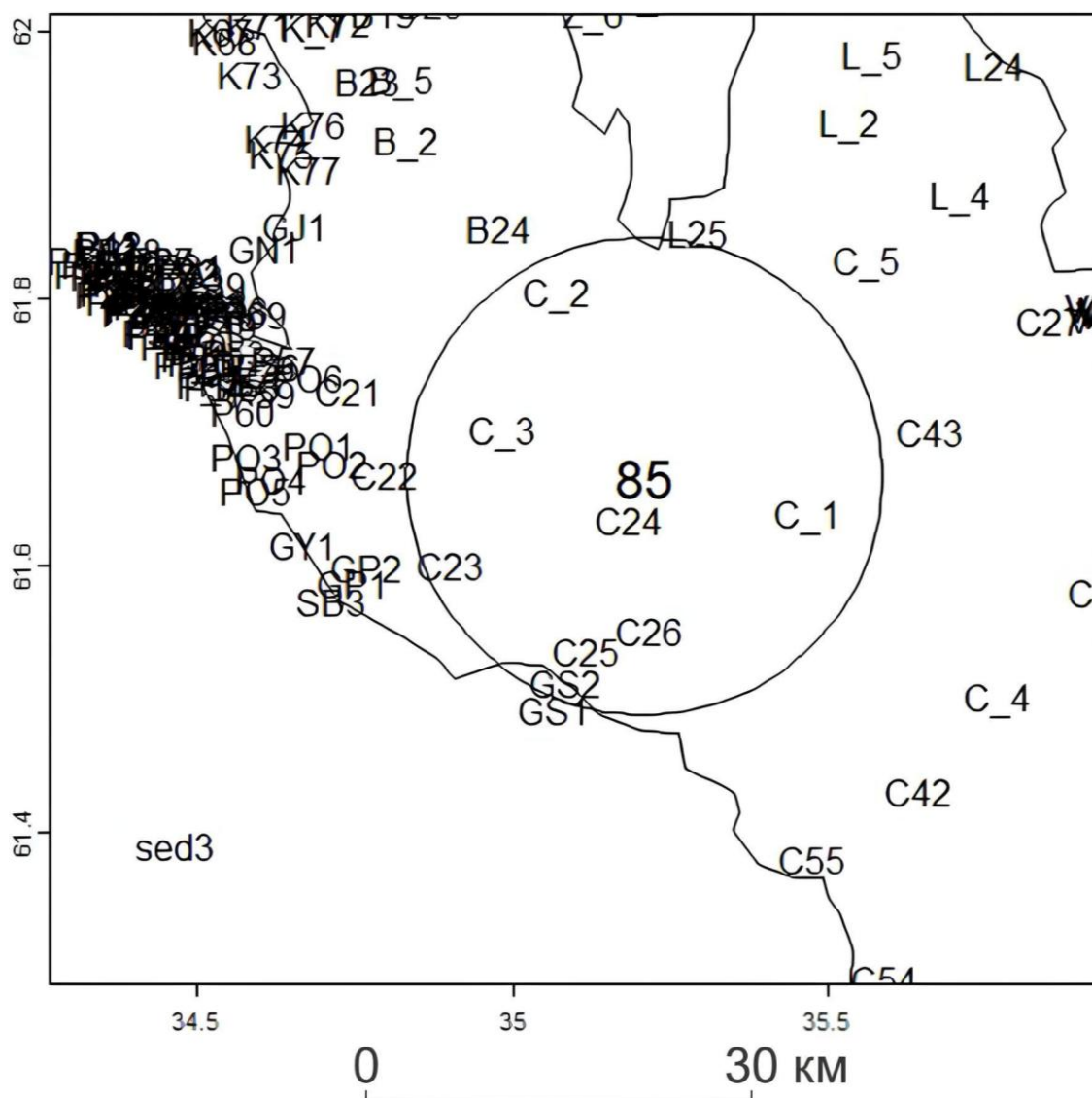


Рис. 2. Определение станций, попавших в окрестности (20 км) точки сети № 85
Fig. 2. Determination of stations located in the area (20 km) of network point No. 85

Далее был подготовлен массив данных для расчета нейронной сети. Для этого анализа было решено взять натурные данные, полученные не в результате интерполяции, но оцененные по реальным пробам. В базу включили все значения первичной продукции (р), полученные на разных станциях безотносительно от расположения точек получения, и все соответствующие им значения гидробиологических показателей. В процессе формирования базы оказалось, что на некоторых станциях, где была измерена первичная продукция, не были получены оценки каких-то других показателей. Например, данных по зоопланктону практически не было на тех станциях, на которых был измерен фотосинтез. В результате из анализа пришлось исключить данные по зоопланктону и температуре воды. Результирующая таблица с натурными данными имела 25 строк и 4 поля (р, b, с, tr).

На основе этой матрицы было построено несколько вариантов нейронных сетей (однослойный персептрон) [Коросов, 2023]. Для настройки использовались 2/3 данных, для проверки точности настройки — 1/3 строк исходного массива. Использование дробных выходных значений и нескольких нейронов позволяют получить на выходе сети также дробные значения — оценки продукции. В роли показателей качества модели выступили

две величины — средние суммы квадратов отклонений модели от реальности, полученные на обучающей и тестовой выборке. Эти величины сравнивали по критерию Фишера (var.test). При отсутствии значимых различий делали вывод о приемлемом качестве модели и об отсутствии эффекта переобучения сети. В процессе настройки варьировалось число нейронов, входящих в один слой. Адекватность модели оценивали по критерию Фишера, сравнивая остаточную дисперсию с модельной $F = S^2_{\text{ост.}} / S^2_{\text{мод.}}$.

Наконец, на последнем этапе на основе построенной нейронной сети выполнили расчет (экстраполяцию) значений первичной продукции для каждой из 142 точек акватории оз. Онежского для двух периодов — с 1982 по 2000 гг. и с 2000 по 2023 гг.

Все расчеты выполнены в среде R.¹

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные данные для построения нейронной сети представляют собой массив из 25 наборов непосредственных оценок четырех характеристик (p, b, c, tr). Эти значения достаточно широко варьируются (рис. 3А), но линейные тренды их направления изменчивости значимо связаны с варьированием показателя продукции (рис. 3Б, табл. 1).

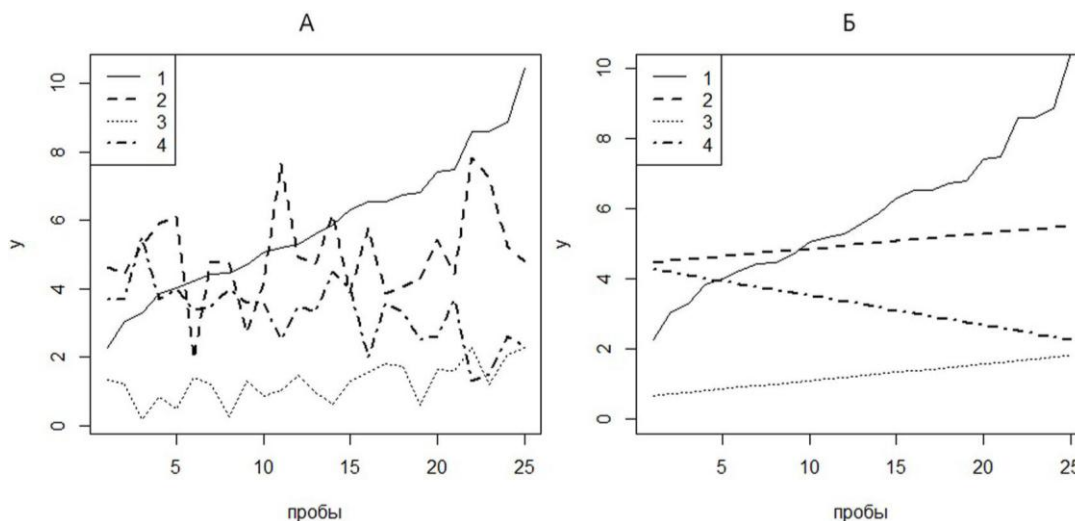


Рис. 3. Упорядоченные по возрастанию значения первичной продукции (1) и соответствующие им значения изучаемых переменных (2 — бактериопланктон, 3 — хлорофилл, 4 — прозрачность воды):

А — исходные данные, Б — линейные тренды

Fig. 3. Primary production values (1) ordered by increasing value and the corresponding values of the studied variables (2 — bacterioplankton, 3 — chlorophyll, 4 — water transparency): A — original data, B — linear trends

Используя эти данные, был выполнен множественный регрессионный анализ (табл. 2); в результирующем уравнении все коэффициенты оказались незначимыми, очевидно, из-за нелинейного характера зависимостей между переменными.

Выполняя многократные расчеты нейронной сети разным числом нейронов, нашли их оптимальное число — 4 нейрона; при большем количестве сеть «переучивалась» и плохо распознавала проверочные данные, при меньшем числе оценки теряли стабильность. Варьируя случайным образом входные значения обучающей выборки, нашли несколько

¹ The R Project for Statistical Computing. Электронный ресурс: <https://www.r-project.org/> (дата обращения 26.07.2023)

вариантов сети, при которых стандартные ошибки для обучающей и проверочной выборок были наименьшими и примерно равными друг другу (порядка 0,2–0,3) и значимо не отличались при $p = 0,05$ (рис. 4–5).

Табл. 1. Коэффициенты корреляции между изучаемыми переменными
(порог значимости для $p=0,05$ составляет $r=0,38$)
Table 1. Correlation coefficients between the studied variables
(the significance threshold for $p=0,05$ is $r=0,38$)

	p	b	c	tr
p	1	0,26	0,65	–0,68
b	0,26	1	–0,02	–0,41
c	0,65	–0,02	1	–0,61
tr	–0,68	–0,41	–0,61	1

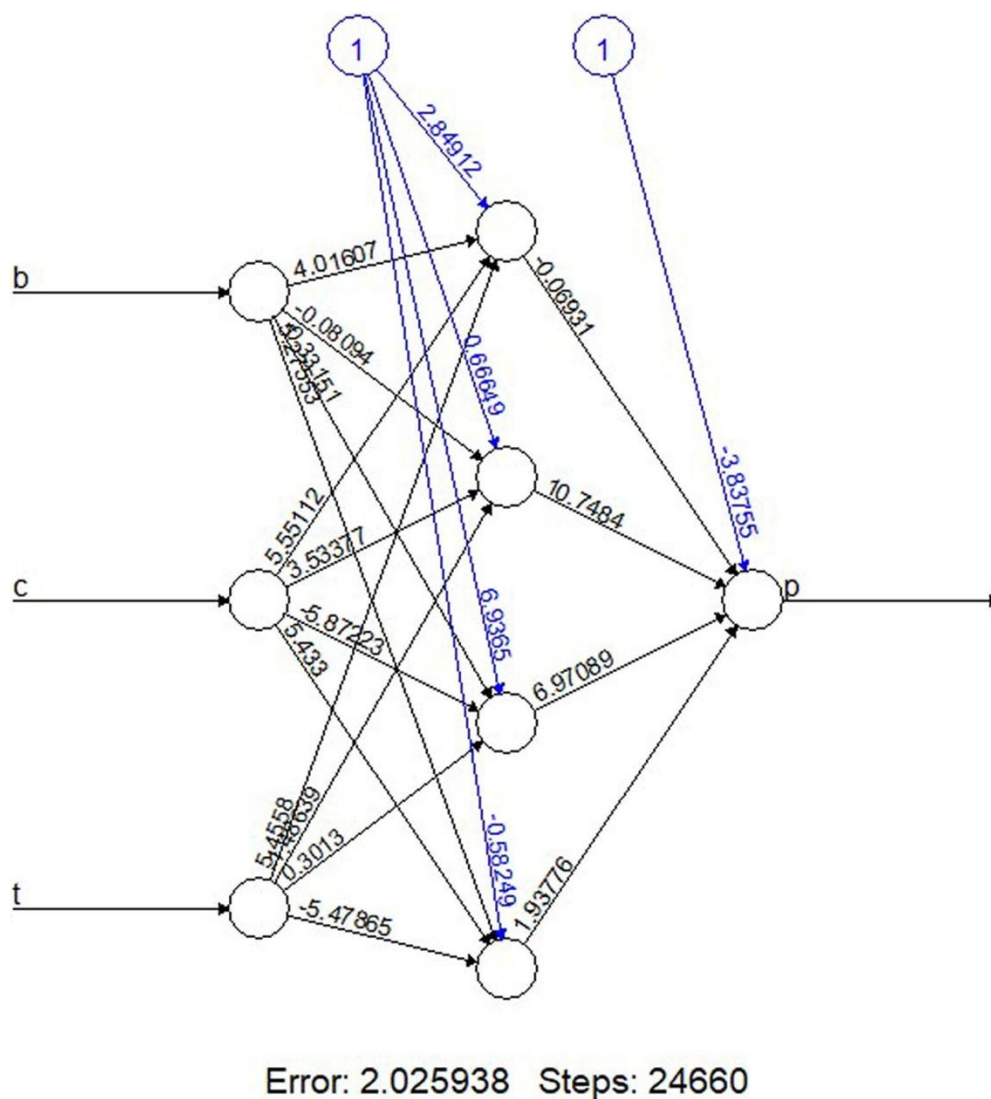


Рис. 4. Нейронная сеть для прогноза первичной продукции
Fig. 4. Neural network for forecasting primary production

Табл. 2. Коэффициенты множественной регрессии (a), их ошибки (m_a)
и оценки уровня значимости (p)
Table 2. Multiple regression coefficients (a), errors (m_a), and significance level estimates (p)

Предиктор	a	m_a	p
Свободный член	6,33	4,57	0,19
b	0,05	0,35	0,89
c	1,32	0,98	0,20
tr	-0,78	0,62	0,23

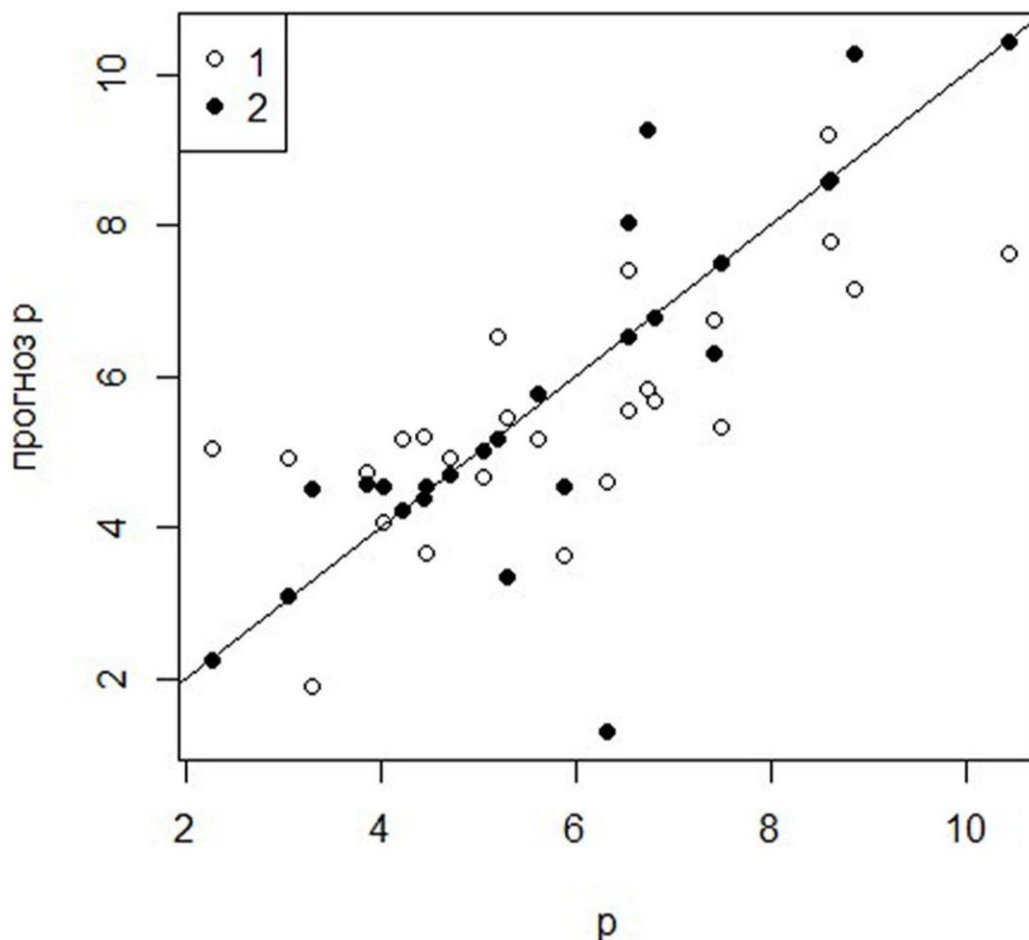


Рис. 5. Соотношение между реальными (p) и расчетными (прогноз p) значениями первичной продукции ($\log(y)$), рассчитанными по модели множественной регрессии (1) и нейронной сети (2)
Fig. 5. The relationship between the measured (p) values of primary production ($\log(y)$) and the calculated (predicted p) values using the multiple regression model (1) and the neural network (2)

Используя разные варианты сети с четырьмя нейронами, авторы выполнили расчет прогнозных значений для всей акватории оз. Онежского, используя заранее подготовленный массив со значениями входных переменных, интерполированных на 142 точки акватории озера (табл. 3). Полученные оценки отображены на картограммах, отражающих относительную величину продуктивности в каждой точке акватории за два периода (рис. 6).

Табл. 3. Расчетные значения первичной продукции ($\text{мг С/м}^3 \cdot \text{сут}$) за два периода для некоторых точек акватории (рис. 1)

Table 3. Calculated values of primary production ($\text{mg C/m}^3 \cdot \text{day}$) for some points in the water area for two periods (Fig. 1)

Точки сети	47	71	88	130
1982–2000 гг.	56	86	35	54
2000–2023 гг.	227	44	35	40

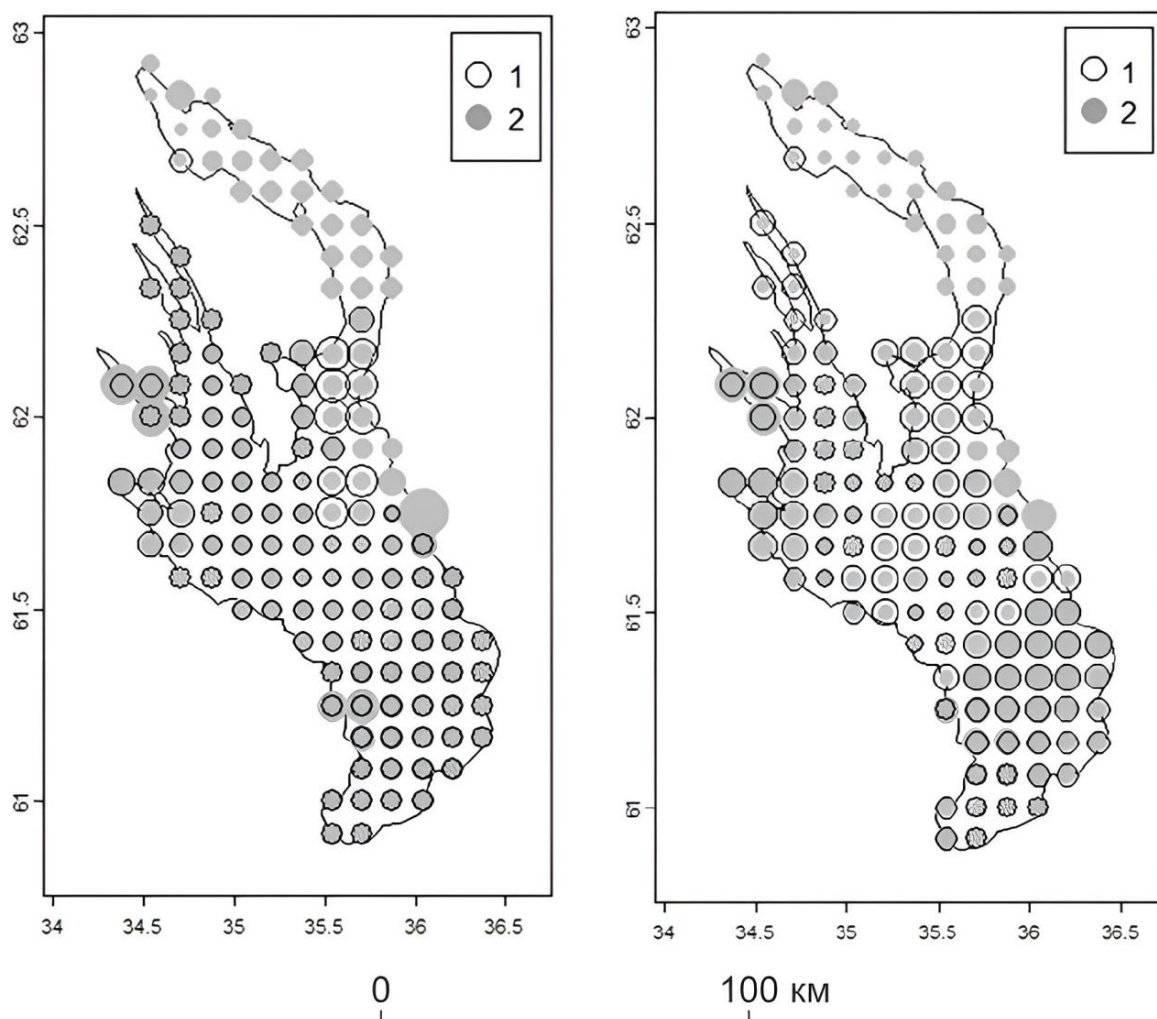


Рис. 6. Оценки первичной продукции на акватории оз. Онежского в разных вариантах нейронной сети. Диаметр точки отражает относительную величину продукции для ее сравнения в разные периоды (1 — для 1982–2000 гг.; 2 — для 2000–2023 гг.)

Fig. 6. Estimates of primary production in the water area of Lake Onego in different versions of the neural network. The diameter of the point reflects the relative value of production for comparison in two different periods (1 — for 1982–2000; 2 — for 2000–2023)

Несмотря на частные различия картограмм, полученных на разных вариантах сети, они отражают ряд характерных закономерностей. Как отмечалось ранее, в центральных частях оз. Онежского первичная продукция имеет минимальные значения, в прибрежной загрязняемой зоне — повышенные [Tekanova, Timakova, 2007]. Так, в Петрозаводской и Кондопожской губах, на побережье которых расположились крупные промышленные

центры, уровни продуктивности выше, чем в других частях акватории вследствие техногенной нагрузки. Отчетливо видны и тренды изменения показателя в последнее время. В открытом плесе озера продуктивность либо уменьшилась, либо сохранилась неизменной. На выходе из Петрозаводской губы продуктивность понизилась, что может быть связано с существенным сокращением нагрузки сточных вод¹. В Кондопожской губе уровень продуктивности существенно возрос. Учитывая, что нагрузка сточных вод на этот залив тоже значительно сократилась за последние 20 лет, повышение продуктивности, видимо, является следствием активной деятельности форелевых хозяйств, действующих в заливе с 2000 г. [Калинкина и др., 2017]. При нарушении водно-биологических обоснований и систематического контроля накопление отходов деятельности форелевых хозяйств, содержащих большое количество биогенных элементов и органических веществ, может быстро привести к эвтрофированию [Рыжков, Дзюбук, 2014]. Ранее ухудшение экологической ситуации отмечалось в прибрежной зоне больших северных озер — шхерном районе оз. Ладожского [Дудакова и др., 2024] и маленьких заливах оз. Онежского [Стерлигова и др., 2009; 2011]. На данном этапе хозяйственная деятельность остается главным фактором, влияющим на продуктивность оз. Онежского.

ВЫВОДЫ

С помощью нейронной сети удалось достаточно точно связать уровень первичной продукции с другими гидробиологическими показателями и выполнить прогноз ее значений для любой точки акватории крупного водоема. Возможность точного прогноза показателей первичной продукции, одного из наиболее трудоемких методов в гидробиологии, по значениям хлорофилла *a*, количеству сапрофитных бактерий и прозрачности воды, обеспечивает получение важной информации для контроля процессов эвтрофирования различных районов оз. Онежского с целью нормирования на водоем антропогенной нагрузки.

Треугольная сглаживающая функция обеспечивает расчет достаточно выровненного ландшафта интерполированных значений без резких перепадов, но с сохранением региональной специфики.

Примененный способ экстраполяции довольно хорошо воспроизводит полученные ранее инструментальным способом закономерности распределения первичной продукции на акватории оз. Онежского. Большие значения первичной продукции отмечались в заливах, которые испытывают интенсивную антропогенную нагрузку от крупных промышленных центров (г. Петрозаводск и г. Кондопога). Меньшие величины первичной продукции были отмечены в открытом плесе оз. Онежского, который сохраняет олиготрофный статус за счет барьерной роли заливов.

Анализ показал, что после 2000 г. в Петрозаводской губе оз. Онежского отмечается тенденция к снижению продуктивности, а продуктивность эвтрофируемой Кондопожской губы, напротив, возросла, особенно в срединной части губы, где в начале 2000-х гг. было размещено большое количество форелевых ферм. Ускорение эвтрофирования Кондопожской губы, связанное с деятельностью форелевых хозяйств, необходимо учитывать для нормализации экологической ситуации в заливе.

¹ Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т., Георгиев А. П., Исакова К. В., Толстиков А. В., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Лимнологические показатели состояния Онежского озера и Выгозерского водохранилища: температура воды, концентрация хлорофилла *a*, продукция фитопланктона. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2023621189, 12.04.2023. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», 2023

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН (государственной регистрация № 121021700117-3).

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out within the framework of the State assignment of Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (№ 121021700117-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алимов А. Ф.* Введение в продукционную гидробиологию. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 152 с.
- Бульон В. В.* Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.
- Бульон В. В.* Радиоуглеродный метод определения первичной продукции фитопланктона, его возможности и ограничения в сравнении с кислородным методом. Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб., 1993. С. 41–47.
- Винберг Г. Г.* Первичная продукция водоемов. Минск: Издательство Академии наук БССР, 1960. 328 с.
- Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году». М.: Минприроды – ООО «Интеллектуальная аналитика», 2024. 707 с.
- Дудакова Д. С., Капустина Л. Л., Митрукова Г. Г., Трифонов А. Е., Зарипова К. М.* Состояние планктонных и бентосных сообществ шхерного района Ладожского озера вблизи садковых рыбоводных хозяйств. Труды ВНИРО, 2024. Т. 196. С. 163–178 DOI: 10.36038/2307-3497-2024-196-163-178.
- 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. Материалы Международной конференции, 2018. Т. 24. Ч. 2. С. 362–370. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-362-370.
- Калинкина Н. М., Коросов А. В., Теканова Е. В.* Экологическая информационная система «Онего». Принципы экологии, 2019. Т. 8. № 1. С. 72–88. DOI: 10.15393/j1.art.2019.8222.
- Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т.* Экосистема Онежского озера: Реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2017. № 1. С. 4–18.
- Китаев С. П.* Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
- Коросов А. В.* Нейронные сети для экологии: введение. Принципы экологии, 2023. № 3. С. 76–96. DOI: 10.15393/j1.art.2023.14002.
- Коросов А. В., Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т., Исакова К. В.* Разработка индексов трофности для Онежского озера с помощью экологической информационной системы. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Международной конференции, 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 256–273. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-256-273.
- Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 374 с.

Рыжков Л. П., Дзюбук И. М. Экологическая безопасность садкового рыбоводства. Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2014. 98 с.

Стерлигова О. П., Кутаев С. П., Ильмаст Н. В., Комулайнен С. Ф., Кучко Я. А., Павловский С. А., Савосин Е. С. Состояние заливов Онежского озера при товарном выращивании форели. Поволжский экологический журнал, 2011. № 3. С. 386–393.

Стерлигова О. П., Кутаев С. П., Ильмаст Н. В., Кучко Я. А., Павловский С. А., Савосин Е. С. Состояние Кефтенъ губы Онежского озера при товарном выращивании радужной форели. Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера. Материалы XXVIII Международной конференции. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 532–528.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 124 с.

Chorus I., Fastner J., Welker M. Cyanobacteria and Cyanotoxins in a Changing Environment: Concepts, Controversies, Challenges. Water, 2021. V. 13. P. 2463–2504. DOI: 10.3390/w1318246.

Cyanotoxins: Occurrence, Causes, Consequence. Berlin: Springer, 2012. 357 p.

Eutrophication: Causes, Consequences and Control. Dordrecht: Springer, 2011. 394 p. DOI: 10.1007/978-90-481-9625-8.

Henderson-Sellers B., Makland H. R. Decaying Lakes: The Origins and Control of Cultural Eutrophication. New York: Wiley, 1987. 254 p.

Magnuson J. J., Webster K. E., Assel R. A., Bowser C. J., Dillon P. J., Eaton J. G., Evans H. E., Fee E. J., Hall R. I., Mortsch L. R., Schindler D. W., Quinn F. H. Potential Effects of Climate Changes on Aquatic Systems: Laurentian Great Lakes and Precambrian Shield Region. Hydrological Processes, 1997. V. 11. No. 3. P. 825–871.

McCann K. S. Food Webs (MPB-50). Princeton: Princeton University Press, 2011. 256 p.

Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. Water Chemistry in Onega Lake and its Tributaries. Water Resources, 2010. V. 37. No. 6. P. 842–853. DOI: 10.1134/S0097807810060102.

Schwefel R., Müller B., Boisgontier H., Wüest A. Global Warming Affects Nutrient Upwelling in Deep Lakes. Aquatic Sciences, 2019. V. 81. No. 50. DOI: 10.1007/s00027-019-0637-0.

Stich H. B., Brinker A. Oligotrophication Outweighs Effects of Global Warming in a Large, Deep, Stratified Lake Ecosystem. Global Change Biology, 2010. V. 16. No. 2. P. 877–888. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02005.x.

Tekanova Ye. V., Timakova T. M. Assessment of the Current Trophic State of Lake Onega by Primary Production of Phytoplankton. Hydrobiological Journal, 2007. V. 43. No. 5. P. 87–90. DOI: 10.1615/HydrobJ.v43.i5.60.

REFERENCES

Alimov A. F. An Introduction to Production Hydrobiology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 152 p. (in Russian).

Boulion V. V. Primary Production of Plankton of Inland Waters. Leningrad: Nauka, 1983. 150 p. (in Russian).

Boulion V. V. Radiocarbon Method for Determining Primary Production of Phytoplankton, its Capabilities and Limitations in Comparison with the Oxygen Method. Methodological Issues of Studying Primary Production of Plankton of Inland Waters. St. Petersburg, 1993. P. 41–47 (in Russian).

Chorus I., Fastner J., Welker M. Cyanobacteria and Cyanotoxins in a Changing Environment: Concepts, Controversies, Challenges. Water, 2021. V. 13. P. 2463–2504. DOI: 10.3390/w1318246.

Cyanotoxins: Occurrence, Causes, Consequence. Berlin: Springer, 2012. 357 p.

Dudakova D. S., Kapustina L. L., Mitrukova G. G., Trifonov A. E., Zaripova K. M. The State of Planktonic and Benthic Communities of the Skerry Region of Lake Ladoga Near Fish Farms. Trudy VNIRO, 2024. V. 196. P. 163–78 (in Russian). DOI: 10.36038/2307-3497-2024-196-163-178.

Eutrophication: Causes, Consequences and Control. Dordrecht: Springer, 2011. 394 p. DOI: 10.1007/978-90-481-9625-8.

Henderson-Sellers B., Makland H. R. Decaying Lakes: The Origins and Control of Cultural Eutrophication. New York: Wiley, 1987. 254 p.

Kalinkina N. M., Korosov A. V., Belkina N. A., Tekanova E. V., Syarki M. T., Korosov A. A. Geographic Information System “Biological Resources of Onego Lake”. InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Conference, 2018. V. 24. Part 2. P. 362–370 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-362-370.

Kalinkina N. M., Korosov A. V., Tekanova E. V. Ecological Information System “Onego”. Principles of the Ecology, 2019. V. 8. No. 1. P. 72–88 (in Russian). DOI: 10.15393/j1.art.2019.8222.

Kalinkina N. M., Tekanova Y. V., Syarki M. T. The Lake Onego Ecosystem: Aquatic Communities’ Response to Anthropogenic Factors and Climate Change. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management, 2017. No. 1. P. 4–18 (in Russian).

Kitaev S. P. Ecological Bases of Bioproductivity of Lakes of Different Natural Zones. Moscow: Nauka, 1984. 207 p. (in Russian).

Korosov A. V. Neural Networks for Ecology: Introduction. Principles of the Ecology, 2023. No. 3. P. 76–96 (in Russian). DOI: 10.15393/j1.art.2023.14002.

Korosov A. V., Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Syarki M. T., Isakova K. V. Development of Trophic Indices for Lake Onego Using of the Ecological Information System. InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Conference, 2021. V. 27. Part 3. P. 256–273 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-256-273.

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: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2015. 374 p. (in Russian).

Magnuson J. J., Webster K. E., Assel R. A., Bowser C. J., Dillon P. J., Eaton J. G., Evans H. E., Fee E. J., Hall R. I., Mortsch L. R., Schindler D. W., Quinn F. H. Potential Effects of Climate Changes on Aquatic Systems: Laurentian Great Lakes and Precambrian Shield Region. Hydrological Processes, 1997. V. 11. No. 3. P. 825–871.

McCann K. S. Food Webs (MPB-50). Princeton: Princeton University Press, 2011. 256 p.

Ryzhkov L. P., Dzyubuk I. M. Environmental Safety of Cage Fish Farming. Petrozavodsk: Publishing House of the Petrozavodsk State University, 2014. 98 p. (in Russian).

Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. Water Chemistry in Onega Lake and its Tributaries. Water Resources, 2010. V. 37. No. 6. P. 842–853. DOI: 10.1134/S0097807810060102.

Schwefel R., Müller B., Boisgontier H., Wüest A. Global Warming Affects Nutrient Upwelling in Deep Lakes. Aquatic Sciences, 2019. V. 81. No. 50. DOI: 10.1007/s00027-019-0637-0.

State Report “On the State and Protection of the Environment of the Russian Federation in 2023”. Moscow: Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation – “Intelligent Analytics” Ltd., 2024. 707 p. (in Russian).

Sterligova O. P., Kitayev S. P., Ilmast N. V., Komulainen S. F., Kuchko Ya. A., Pavlovsky S. A., Savosin E. S. Status of Onega Lake Bays Affected by Commercial Rainbow Trout Cultivation. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2011. No. 3. P. 386–393 (in Russian).

Sterligova O. P., Kitaev S. P., Ilmast N. V., Kuchko Ya. A., Pavlovsky S. A., Savosin E. S. The State of the Keften Bay of Lake Onego During Commercial Cultivation of Rainbow Trout. *Biological Resources of the White Sea and Inland Waters of the European North. Proceedings of the XXVIII International Conference*. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2009. P. 532–528 (in Russian).

Stich H. B., Brinker A. Oligotrophication Outweighs Effects of Global Warming in a Large, Deep, Stratified Lake Ecosystem. *Global Change Biology*, 2010. V. 16. No. 2. P. 877–888. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02005.x.

Tekanova Ye. V., Timakova T. M. Assessment of the Current Trophic State of Lake Onega by Primary Production of Phytoplankton. *Hydrobiological Journal*, 2007. V. 43. No. 5. P. 87–90. DOI: 10.1615/HydrobJ.v43.i5.60.

The Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation. General Summary. St. Petersburg: Science Intensive Technologies, 2022. 124 p. (in Russian).

Vinberg G. G. Primary Production of Water Bodies. Minsk: Publishing House of the BSSR Academy of Sciences, 1960. 328 p. (in Russian).