

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.94>

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ БАКТЕРИОПЕРИФИТОНА  
В ЭСТУАРНЫХ ЗОНАХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ**

Научная статья

**Григорьева Н.Ю.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-0721-0110;

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский электротехнический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (renes3[at]mail.ru)

**Аннотация**

В данной работе представлена реализация нейронной сети прямого распространения в применении к задаче построения регрессионной модели зависимости количественных параметров сообществ бактериоперифитона от гидролого-гидрохимического режима водного объекта. Исследования бактериоперифитона проводили с октября 2018 по октябрь 2019 года на трех станциях, расположенных в эстуарной зоне Карского моря. Гидрохимические и микробиологические анализы проб делали в трех повторностях. Для решения поставленной задачи была выбрана архитектура искусственной нейронной сети прямого распространения с двумя скрытыми слоями. Применение нейронной сети прямого распространения показало неплохую способность к построению регрессионной модели на предложенных данных. С помощью нейросетевого моделирования показана возможность обучения нейронной сети для описания зависимости между физико-химическими параметрами водного объекта и общей численностью бактериоперифитона.

**Ключевые слова:** бактериоперифитон, нейронные сети, регрессионная модель, эпифитон, цианобактерии.

**APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR MODELLING BACTERIOPERIPHYTON DYNAMICS IN  
ESTUARY ZONES OF ARCTIC SEAS**

Research article

**Grigoreva N.Y.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-0721-0110;

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Electrotechnical University, Saint-Petersburg, Russian Federation

\* Corresponding author (renes3[at]mail.ru)

**Abstract**

This paper presents the implementation of a feedforward neural network for the application to the problem of constructing a regression model for the dependence of quantitative parameters of bacterioperiphyton communities on the hydrological and hydrochemical regime of a water body. Bacterioepilithon studies were conducted from October 2018 to October 2019 at three stations located in the estuarine zone of the Kara Sea. Hydrochemical and microbiological analyzes of samples were done in triplicate. To solve the problem, the architecture of a feedforward neural network with two hidden layers was chosen. The use of a feedforward neural network showed a good ability to build a regression model on the proposed data. Using neural network modeling the possibility of training a neural network to describe the relationship between the physicochemical parameters of a water body and the total number of bacterioepilithon was shown.

**Keywords:** bacterioperiphyton, neural networks, regression model, epilithon, cyanobacteria.

**Введение**

Важным, но не слишком хорошо изученным вопросом в экологии морских микроорганизмов, является пространственно-временная динамика параметров сообществ цианобактерий перифитона естественных субстратов на литорали, их отклик на антропогенное воздействие. В экосистемах, подверженных антропогенной нагрузке, таких как Обская губа, прослеживается изменения качественного и количественного состава микроценозов. Но работы по изучению бактериоперифитона, а также цианобактерий литорали Обской губы ранее практически не проводились [1], [2], [3], [4], [5]. Полученные в этой работе сведения о количественном составе и структуре сообществ бактерий и цианобактерий помогут в понимании закономерностей формирования и функционирования прибрежных бактериоценозов арктических морей.

Обская губа – крупнейший залив Карского моря, замыкающий водоем р. Обь, имеющий важное рыбохозяйственное значение. Согласно современным научным классификациям, Обская губа – это эстуарий лиманного типа. Его длина примерно 750 км, ширина от 30 до 75 км, водная площадь 55,5 тыс. км<sup>2</sup> и объемом воды 445 км<sup>3</sup>. Определяющее значение для гидрологического режима Обской губы и процессов, в ней происходящих, имеет р. Обь, которая поставляет в Обскую губу большую часть стока [6], [7], [8], [9].

Западный берег южной части Обской губы изрезан многочисленными заливами и бухтами. В связи с тем, что большую часть времени в году (более 200 дней) Обская губа покрыта льдом, гидробиологический режим в зимнее время значительно отличается от летнего, поэтому отмечаются изменения качественного и количественного развития зоопланктона. Зимой подо льдом в Обской губе обитают такие планктоноядные рыбы, как ряпушка, молодь сиговых рыб, а также зимует большинство других промысловых рыб. При этом по отчетам Тюменского филиала ФГБНУ

«ВНИРО» за 2024 год рыбопродуктивность (РП) реки Обь (длина 3650 км) составляет около 33 кг/га, концентрация личинок рыб на пойме (КЛ) – 11 экз./м<sup>2</sup> и Обской губы (длина – 750 км, ширина – 30–75 км) составляет около 33 кг/га, концентрация личинок рыб на пойме (КЛ) – 11 экз./м<sup>2</sup>, а рыбопродуктивность ее притока реки Иртыш составляет 30 кг/га, а КЛ рыб на пойме – 3,8 экз./м<sup>2</sup>. В отличие от Обской губы, в Тазовской губе (длина – 330 км, ширина – 45 км) рыбопродуктивность ниже и составляет около 29,4 кг/га, КЛ рыб на пойме – 10,02 экз./м<sup>2</sup> [10].

В мелких реках (ручьях, протоках) длиной менее 10 км (пример ручей без названия длиной 6 км (72°45'20,0618", 60°49'13,8343")), и озерах площадью менее 0,5 км<sup>2</sup> (пример: озеро бн (Соленое) площадь около 0,4 км<sup>2</sup> (60°47'32,194", 69°52'1,899"), озеро бн (71°55'51,3546", 72°22'01,9260" площадь около 0,144 км<sup>2</sup>)) ХМАО и ЯНАО рыбопродуктивность крайне низка. Соответственно в реках – РП равна 0.12 кг/га, КЛ – 0.07 экз./м<sup>2</sup>, а в озерах – РП равна 0,09 кг/га, КЛ – 0,03 экз./м<sup>2</sup>. Рыбы в них могут заходить во время нереста. Поскольку все мелкие протоки и озера полностью промерзают на значительную часть года и в большинстве случаев (особенно в северной части), они являются изолированными. Промерзание озер начинается в конце сентября – начале октября, в зависимости от суровой зимы толщина льда колеблется от 0,9 до 1,5 м, это говорит о полном их промерзании до дна.

Бактериальные биопленки (бактериоперифитон) – это структурированные сообщества бактерий одного или 2-3 видов, состоящие из активно функционирующих клеток и их покоящихся форм, включенных в покрывающий различные поверхности внеклеточный матрикс [11]. К перифитону относится эпицитон, где в качестве поверхностей выступают камни, валуны и скалы [12].

Структура и состав перифитонного сообщества, в частности эпицитона, представляют большой научный интерес как модель для изучения закономерностей формирования и функционирования природных экосистем, так как уникальные свойства локальных местообитаний влияют на признаки микробных биопленок, и они могут отражать характерные особенности окружающей среды [13], [14], [15].

Известно, что условия окружающей среды и взаимоотношения между микроорганизмами играют значительную роль в изменчивости состава, структуры, физиологической активности и функционировании морских биопленок. Но до сих пор недостаточно изученным вопросом в экологии морских микроорганизмов остается пространственно-временная динамика количественных параметров бактериальных биопленок на каменистых субстратах в приливно-отливной зоне, их взаимоотношения с биотическими компонентами экосистемы и отклик на гидролого-гидрохимический режим водного объекта и антропогенное воздействие [16].

Искусственные нейронные сети (ИНС) в последнее время довольно часто используются для моделирования сложных экосистем, поскольку они могут предсказывать их реакцию на изменения экологических переменных (например, поступление питательных веществ). Кроме того, ИНС можно использовать для обнаружения взаимосвязей между параметрами внешней среды и функционировании экосистем. В работах [17], [18], [19] рассматривается нейросетевая регрессионная модель для прогнозирования численности бактериопланктона по физико-химическим параметрам условий среды и описываются некоторые особенности ее разработки. Для моделирования используются многолетние данные по фитопланктону в Кольском заливе Баренцева моря. В зарубежной литературе можно найти более разнообразные варианты применения нейросетевых технологий в задачах биологического мониторинга. Например, в работе [20] многослойный перцептрон был применен в задаче определения фитопланктона в морской воде при оптическом дистанционном зондировании. Определение проводилось на основе концентрации хлорофилла *a* или поглощения пигментного вещества. Реализация алгоритмов машинного обучения была выполнена на основе экспериментального набора данных, собранных в прибрежной зоне северной части Адриатического моря. В работе [21] описана разработка модели искусственной нейронной сети для оценки глобальной первичной продукции фитопланктона. Обучение модели проводилось на основе вертикальных профилей первичной продукции фитопланктона, которые были получены во время океанографических экспедиций в северо-западной Атлантике, у побережья Соединенных Штатов, в восточной экваториальной части Тихого океана, у западного побережья Южной Америки, а также у западного побережья Соединенных Штатов. В работе [22] на основе физических и химических свойств воды служили взаимодействующими предикторами для тенденций и моделей хлорофилла *a* и чистой продукции экосистемы. Chl *a* изменялся в зависимости от сезона и вдоль градиента солёности. Исследования проводились на реке Ньюз (Северная Каролина) и реке Траут (Флорида). ИНС превзошли сопоставимые модели линейной регрессии и надежно моделировали концентрации Chl *a*, обозначая очевидные нелинейные взаимодействия между абиотическими и индикаторными переменными. В работе [23] искусственные нейронные сети использовать для оценки уровней первичной продукции и доминирующих видов фитопланктона в водохранилище плотины Демирдёвен (Турция).

Целью данной работы является реализация нейронной сети прямого распространения в применении к задаче построения регрессионной модели зависимости количественных параметров сообществ бактерий эпицитона на литорали от гидролого-гидрохимического режима водного объекта. Модель строится по наборам данных, полученных с трех станций в эстуарии реки Оби на побережье Карского моря, с которых каждый месяц отбирали пробы воды и эпицитона в трех повторностях в период с октября 2018 по октябрь 2019 годы.

### Методы и принципы исследования

Исследования бактериоэпицитона проводили с октября 2018 по октябрь 2019 года на трех станциях, расположенных в южной и средней части Обской губы: станция 1 – Мыс Каменный (68°28'08" с. ш. 73°35'47" в. д.), станция 2 – Новый Порт (67°41'31" с. ш. 72°53'47" в. д.), станция 3 – село Сеяха (70°10'00" с. ш. 72°30'30" в. д.). Все станции находятся в Ямальском районе Ямало-Ненецкого автономного округа. Две первые станции расположены на западном побережье Обской губы, а третья в средней части полуострова Ямал на реке Сёяхе в месте ее впадения в Обскую губу. Станции различаются гидрохимическими характеристиками и степенью антропогенной нагрузки.

Пробы воды для исследования бактериоэпицитона отбирали стерильной стеклянной емкостью объемом 1 л у уреза воды на расстоянии от дна не менее 20 см. Характеристика воды на станциях измерялась по 10 признакам:

температура, соленость, водородный показатель (рН), концентрация растворенного в воде кислорода, насыщение воды кислородом, биохимическое потребление кислорода, концентрации аммонийного азота, нитратного азота, нитритного азота, фосфатов.

Естественные субстраты (камни объемом 200–230 см<sup>3</sup>) отбирали во время сизигийного отлива с нижней литорали, помещали их в стерильные стеклянные емкости со 100 мл стерильной фильтрованной морской воды для предотвращения высыхания материала.

Подготовку проб бактериоэпилитона для микробиологического исследования проводили в лаборатории с соблюдением правил асептики и антисептики. Подсчет численности бактерий в пробах проводили с помощью люминесцентного микроскопа МИКМЕД-2-вар.2 (Россия) на окрашенных суданом черным поликарбонатных фильтрах производства ОИЯИ (г. Дубна, Россия) диаметром 25 мм и размером пор 0.23 мкм после окрашивания клеток флуорохромом акридиновым оранжевым.

### Результаты экспериментов

Гидрохимические анализы воды исследуемого объекта, включавшие определение концентрации кислорода, ионов аммония, нитритов, нитратов, фосфатов проводили в соответствии с руководящими документами «Руководство по химическому анализу морских вод» (РД 52.10.243 – 92) и «Биохимическое потребление кислорода в водах. Методика выполнения измерения скляночным методом» (РД 52.24.420 – 2006).

Для исследования отбирали по три каменистых субстрата с каждой станции. Гидрохимические и микробиологические анализы проб делали в трех повторностях. В таблице 1 приведены обработанные результаты экспериментов. Количественные параметры бактериоценоза эпилитона включали учет общей численности бактерий эпилитона, биомассы и среднего объема.

Таблица 1 - Количественные результаты исследований эпилитонных цианобактерий Обской губы

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.94.1>

Месяц, год	Показатель								
	Общая численность цианобактерий, ОЦБ-э/л, (M±m)×10 <sup>5</sup> кл/см <sup>2</sup>			Биомасса цианобактерий, БЦБ-э/л, (M±m), мг/м <sup>2</sup>			Средний объем цианобактерий, V ЦБ-э/л, мкм <sup>3</sup>		
	Номера станций								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Октябрь, 2018	12,126 ±4,933	4,227± 1,258	6,777± 1,354	8,612± 2,88	2,112± 0,66	33,440 ±5,81	0,73	0,51	4,30
Ноябрь, 2018	7,849± 2,953	3,204± 1,367	3,797± 1,103	3,139± 1,18	0,685± 0,22	9,340± 2,46	0,40	0,16	2,23
Декабрь, 2018	7,523± 1,856	6,965± 1,249	3,257± 1,001	3,232± 0,83	3,175± 0,70	2,782± 1,11	0,50	0,70	1,10
Январь, 2019	7,891± 1,995	7,466± 1,987	5,402± 2,672	1,578± 0,40	2,240± 0,60	9,545± 2,72	0,20	0,30	1,77
Февраль, 2019	10,964 ±4,045	2,322± 1,100	1,281± 1,394	4,386± 0,82	0,139± 0,07	1,153± 1,25	0,40	0,06	0,90
Март, 2019	16,740 ±3,356	17,430 ±3,587	5,329± 2,346	8,370± 1,68	10,458 ±2,15	26,645 ±6,73	0,50	0,60	5,00
Апрель, 2019	18,847 ±3,668	20,240 ±3,923	5,111± 2,556	13,193 ±2,57	20,240 ±3,92	34,295 ±6,71	0,70	1,00	3,80
Май, 2019	81,057 ±19,345	12,379 ±2,579	2,257± 2,003	91,837 ±10,60	119,66 6±24,93	12,639 ±1,22	1,13	9,67	5,60
Июнь, 2019	12,977 ±1,394	8,033± 2,305	6,688± 2,921	252,18 0±27,09	24,421 ±2,18	106,79 04±2,64	19,43	3,04	15,97
Июль, 2019	33,685 ±3,677	3,919 ± 1,623	2,225± 1,369	28,296 ±3,09	17,136 ±7,10	4,449± 1,74	0,84	4,37	2,00
Август, 2019	22,587 ±3,028	16,721 ±2,001	1,756± 0,222	9,328± 1,25	128,63 1±15,93	5,080± 0,64	0,41	7,69	2,89
Сентябрь, 2019	15,214 ±2,193	2,694± 1,355	1,815± 0,648	22,822 ±3,29	4,298± 2,16	1,156± 0,41	1,50	1,60	0,64
Октябрь	14,422	3,574±	3,623±	12,691	2,609±	6,848±	0,88	0,73	1,89

Месяц, год	Показатель								
	Общая численность цианобактерий, ОЦБ-э/л, $(M \pm m) \times 10^5$ кл/см <sup>2</sup>			Биомасса цианобактерий, БЦБ-э/л, $(M \pm m)$ , мг/м <sup>2</sup>			Средний объем цианобактерий, V ЦБ-э/л, мкм <sup>3</sup>		
	Номера станций								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ь, 2019	±1,962	1,644	1,649	±2,37	1,43	3,12			

### Описание модели нейронной сети

На основе обзора специализированной литературы и вида исходных данных, для решения задачи была выбрана архитектура искусственной нейронной сети прямого распространения. Схема рассматриваемой нейронной сети показана на рисунке 1.

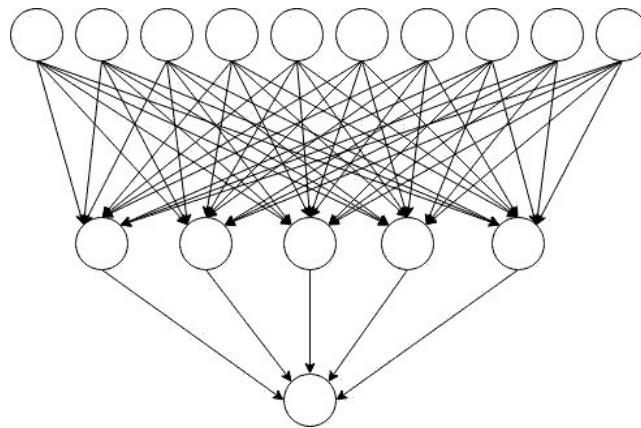


Рисунок 1 - Схема нейронной сети  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.94.2>

В общем случае нейронная сеть состоит из множества взаимосвязанных элементов – нейронов, объединенных в слои: входной слой, скрытые слои, выходной слой. Слои характеризуются весовыми коэффициентами и функцией активации; результат применения функции активации на скалярном произведении вектора входных данных и вектора весовых коэффициентов является результатом работы слоя. На входном слое количество нейронов равно числу признаков наблюдений. На выходном слое количество нейронов равно числу объектов, которые предсказываются, для данной задачи число равно 1. Для решения задачи были опробованы структуры нейронных сетей с одним и двумя скрытыми слоями, размер каждого равен 5 нейронам. Для каждой архитектуры подобрано свое значение числа циклов обучения: 500 и 530 эпох. Функцией активации на скрытых слоях является гиперболический тангенс, а на выходном слое – функция ReLU, так как у выходного вектора все значения должны быть положительными.

До внедрения нейронной сети, исходные данные должны быть стандартизированы. Стандартизация данных позволяет уменьшить их разброс и улучшить качество построения модели. Стандартизация данных производилась по следующей формуле:  $y = (x - x_{cp})/\sigma$ , где  $x_{cp}$  – среднее значение признака,  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

Для оценки работы исследуемой нейронной сети использовалась ошибка регрессии, которая вычислялась на каждой эпохе по формуле среднеквадратичного отклонения (MSE). В качестве метода обучения нейронной сети использовался метод градиентного спуска (GD), так как он наиболее прост для реализации и подходит для начальной реализации нейросетей.

### Обсуждение результатов

Задача состояла в построении регрессионной модели, которая должна была выявить зависимость между состоянием среды, описываемым указанными признаками, и общей численностью эпилимтона – сообщества цианобактерий на каменистых грунтах. Решение задачи основано на разработке и обучении искусственной нейронной сети. Наблюдениями в данной задаче являются время (месяцы) сбора проб с трех станций, на каждой станции по 13 наблюдений. Нейронная сеть обучена на первых двух станциях, а тестирование проводилось по третьей. Количественные параметры бактериоценоза эпилимтона включали учет общей численности и биомассы эпилимтонных цианобактерий.

На рисунке 2 и рисунке 3 представлены результаты применения нейронной сети с двумя скрытыми слоями. На рисунке 2 изображена диаграмма зависимости между реальными значениями общей численности цианобактерий эпилимтона и значениями, полученными нейронной сетью с двумя скрытыми слоями. Сеть с одним скрытым слоем показала лучшую зависимость на обучающих данных (не показана), чем сеть с двумя скрытыми слоями, однако тестовые данные лучше предсказывались сетью с двумя скрытыми слоями (рис. 2). Поскольку точность распознавания

тестовой выборки является приоритетной задачей, то здесь представлены результаты для нейронной сети с двумя скрытыми слоями.

На рисунке 3 представлены результаты ошибки на каждой эпохе обучения. Из рисунка следует, что по мере обучения ошибка снижается до приемлемого уровня.

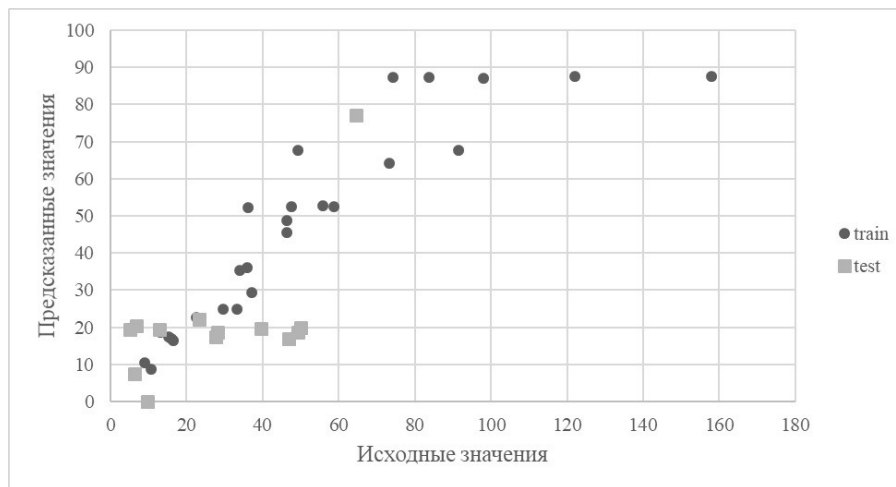


Рисунок 2 - Результат работы нейронной сети  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.94.3>

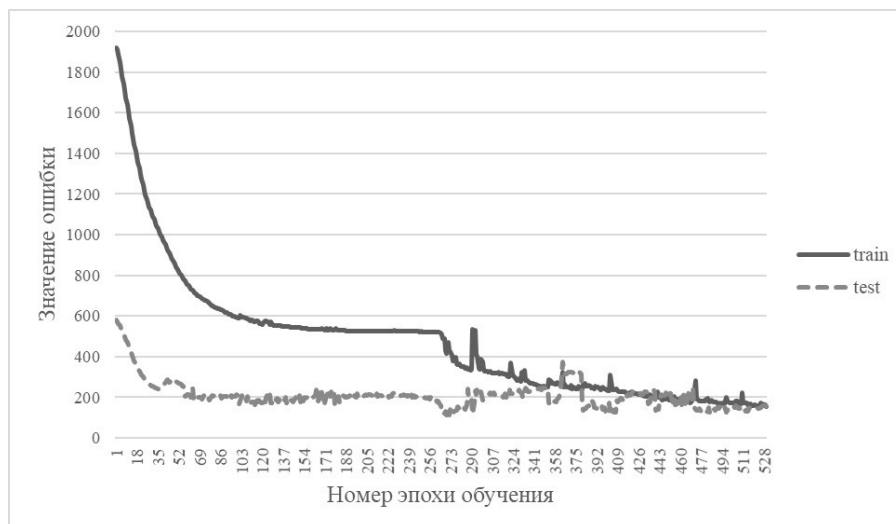


Рисунок 3 - Графики ошибки обучения и тестирования нейронной сети  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.94.4>

### Заключение

Данные о степени развития водорослей в Обской губе необходимы для оценки биологической продуктивности речных экосистем всего бассейна реки Оби. Применение нейронной сети прямого распространения показало неплохую способность к построению регрессионной модели на предложенных данных.

С помощью нейросетевого моделирования показана возможность построения регрессионной модели для отслеживания и предсказания зависимости между физико-химическими параметрами водного объекта, такими как температура, соленость, водородный показатель (pH), концентрация растворенного в воде кислорода, насыщение воды кислородом, биохимическое потребление кислорода, концентрации аммонийного азота, нитратного азота, нитритного азота, фосфатов, и общей численностью бактериоэпилитона на примере литорали Обской губы.

Результаты приведенных исследований могут быть использованы для обоснования системы экологического мониторинга и нормирования воздействия на экосистемы рек бассейна Оби.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

- Макаревич П. Р. Годовой сукцессионный цикл пелагических фитоценозов эстуарных экосистем северных морей России [Баренцева, Карского] / П. Р. Макаревич // Альгология. — 2008. — Т. 18, № 4. — С. 386–392.
- Песегов В. Г. Экология гетеротрофных бактерий в заливах северных морей / В. Г. Песегов // Гидробиологические исследования в заливах и бухтах северных морей России. — Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1994. — С. 31–38.
- Исаченко Б. Л. Избранные труды / Б. Л. Исаченко. — М. : Изд-во АН СССР, 1951. — 250 с.
- Павлов В. Е. Функции распределения концентраций хлорофилла и взвешенного вещества в водах Обской губы и центральной части Карского моря / В. Е. Павлов, И. В. Хвостов, Н. Ю. Курепина [и др.] // Оптика атмосферы и океана. — 2019. — Т. 32, № 12. — С. 978–982. DOI: 10.15372/AOO20191204.
- Колисниченко Н. А. Математическая обработка спутниковых данных для изучения распространенности загрязняющих веществ в водах Обской губы / Н. А. Колисниченко, Л. А. Хворова, Н. М. Ковалевская // Информация и образование: границы коммуникаций. — 2018. — № 10(18). — С. 85–86.
- Абдуллина Г. Х. Зоопланктон бухты Новый Порт (Обская губа, Карское море) в подледный период / Г. Х. Абдуллина, В. А. Алексюк, М. С. Бондарь // Проблемы обеспечения экологической безопасности и устойчивое развитие арктических территорий : сб. материалов Всерос. конф. с междунар. участием II Юдахинские чтения, Архангельск, 24–28 июня 2019 г. — Архангельск : ОМ-медиа, 2019. — С. 204–208.
- Михайлов В. Н. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей / В. Н. Михайлов, С. Л. Горин // Водные ресурсы. — 2012. — Т. 39, № 3. — С. 243–257.
- Москаленко Б. К. Биологические основы эксплуатации и воспроизводства сиговых рыб Обского бассейна / Б. К. Москаленко; отв. ред. Б. Г. Иоганзен. — Тюмень : Труды Обь-Тазовского отд. ВНИОРХ (новая серия), 1958. — Т. 1. — 250 с.
- Лапин С. А. Специфика формирования зон повышенной продуктивности в Обском эстуарии / С. А. Лапин // Среда обитания водных биологических ресурсов. Труды ВНИРО. — М., 2014. — Т. 152. — С. 146–153.
- Отчет Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии за 2024 год (Тюменский филиал). — Тюмень : ФГБНУ «ВНИРО» («Госрыбцентр»), 2024. — 38 с.
- Davey M. E. Microbial biofilms: from ecology to molecular genetics / M. E. Davey, G. A. O'Toole // Microbiology and molecular biology reviews. — 2000. — Vol. 64, № 4. — P. 847–867.
- Протасов А. А. Перифитон как экопическая группировка гидробионтов / А. А. Протасов // Journal of Siberian Federal University. Biology. — 2010. — № 1. — С. 20–56.
- Forster R. M. Biodiversity-ecosystem function relationship in microphytobenthic diatoms of the Westerschelde estuary / R. M. Forster, V. Creach, K. Sabbe [et al.] // Marine Ecology Progress Series. — 2006. — № 311. — P. 191–201.
- Moss J. A. Stability and change in estuarine biofilm bacterial community diversity / J. A. Moss, A. Nocker, J. E. Lepo [et al.] // Applied Environmental Microbiology. — 2006. — № 72. — P. 5679–5688.
- Dobretsov S. Marine biofilms. Pt. 9 / S. Dobretsov // Biofouling. — New Delhi : Aptara Inc., 2010. — P. 123–137.
- Шарапова Т. А. Зооперифитон внутренних водоемов Западной Сибири / Т. А. Шарапова. — Новосибирск, 2007. — 167 с. — ISBN 978-5-02-023203-7.
- Zhangirov T. R. Forward Propagation Neural Network Weighting Analysis as a Model Estimation Method / T. R. Zhangirov, A. B. Krevchik, D. V. Zuev [et al.] // II International Conference on Neural Networks and Neurotechnologies (NeuroNT). — IEEE, 2021. — P. 10–12.
- Perkov A. S. Peculiarities of regression model design based on neural networks / A. S. Perkov, T. R. Zhangirov, N. Y. Grigoryeva [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1658. — P. 012020.
- Grigoryeva N. Y. Specific features of feed-forward neural networks application in classification and regression problems in algology / N. Y. Grigoryeva, T. R. Zhangirov, A. A. Liss // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1703, № 1. — P. 012032.
- D'Alimonte D. Phytoplankton determination in an optically complex coastal region using a multilayer perceptron neural network / D. D'Alimonte, G. Zibordi // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2003. — Vol. 41, № 12. — P. 2861–2868.
- Mattei F. A depth-resolved artificial neural network model of marine phytoplankton primary production / F. Mattei, S. Franceschini, M. Scardi // Ecological Modelling. — 2018. — Vol. 382. — P. 51–62.
- Millie D. F. Neural net modeling of estuarine indicators: Hindcasting phytoplankton biomass and net ecosystem production in the Neuse (North Carolina) and Trout (Florida) Rivers, USA / D. F. Millie [et al.] // Ecological Indicators. — 2006. — Vol. 6, № 3. — P. 589–608.
- Kilic H. Automata networks as preprocessing technique of artificial neural network in estimating primary production and dominating phytoplankton levels in a reservoir : an experimental work / H. Kilic [et al.] // Ecological Informatics. — 2006. — Vol. 1, № 4. — P. 431–439.

## Список литературы на английском языке / References in English

1. Makarevich P. R. Godovoj sukcesionnyj cikl pelagicheskikh fitocenzozov jestuarnyh jekosistem severnyh morej Rossii [Barentseva, Karskogo] [Annual Succession Cycle of Pelagic Phytocenoses in Estuarine Ecosystems of Russian Northern Seas [Barents, Kara]] / P. R. Makarevich // *Algologija* [Algology]. — 2008. — Vol. 18, № 4. — P. 386–392. [in Russian]
2. Pesegov V. G. Jekologija geterotrofnih bakterij v zalivah severnyh morej [Ecology of Heterotrophic Bacteria in Bays of Northern Seas] / V. G. Pesegov // *Gidrobiologicheskie issledovanija v zalivah i buhtah severnyh morej Rossii* [Hydrobiological Studies in Bays and Inlets of Russian Northern Seas]. — Apatity :KSC RAS Publishing House, 1994. — P. 31–38.[in Russian]
3. Isachenko B. L. Izbrannye trudy [Selected Works] / B. L. Isachenko. — Moscow : Publishing House of AS USSR, 1951. — 250 p.[in Russian]
4. Pavlov V. E. Funkcii raspredelenija koncentracij hlorofilla i vzheshennogo veshhestva v vodah Obskoj guby i central'noj chasti Karskogo morja [Distribution Functions of Chlorophyll and Suspended Matter Concentrations in Waters of the Ob Bay and Central Kara Sea] / V. E. Pavlov, I. V. Hvostov, N. Ju. Kurepina [et al.] // *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. — 2019. — Vol. 32, № 12. — P. 978–982. DOI: 10.15372/AOO20191204.[in Russian]
5. Kolnischchenko N. A. Matematicheskaja obrabotka sputnikovyh dannyh dlja izuchenija rasprostranennosti zagryznajushchih veshhestv v vodah Obskoj guby [Mathematical Processing of Satellite Data for Studying Pollutant Distribution in Ob Bay Waters] / N. A. Kolnischchenko, L. A. Hvorova, N. M. Kovalevskaja // *Informacija i obrazovanie: granicy kommunikacij* [Information and Education: Communication Boundaries]. — 2018. — № 10(18). — P. 85–86.[in Russian]
6. Abdullina G. H. Zooplankton buhty Novyj Port (Obskaja guba, Karskoe more) v podlednyj period [Zooplankton of Novy Port Bay (Ob Bay, Kara Sea) During Ice-Covered Period] / G. H. Abdullina, V. A. Aleksjuk, M. S. Bondar // *Problemy obespechenija jekologicheskoj bezopasnosti i ustojchivoje razvitiie arkticheskikh territorij* [Environmental Safety and Sustainable Development of Arctic Territories] :collection of materials of the All-Russian Conf. with international participation II Yudakhin Readings, Arkhangelsk, June 24–28, 2019. — Arkhangelsk: OM-media, 2019. — P. 204–208.[in Russian]
7. Mihajlov V. N. Novye opredelenija, rajonirovanie i tipizacija ust'evyh oblastej rek i ih chastej [New Definitions, Zoning and Typification of River Estuaries and Their Parts] / V. N. Mihajlov, S. L. Gorin // *Vodnye resursy* [Water Resources]. — 2012. — Vol. 39, № 3. — P. 243–257.[in Russian]
8. Moskalenko B. K. Biologicheskie osnovy jekspluatacii i vosproizvodstva sigovyh ryb Obskogo bassejna [Biological Foundations of Exploitation and Reproduction of Whitefish in the Ob Basin] / B. K. Moskalenko; resp. ed. B. G. Ioganzena. — Tyumen :Works of the Ob-Tazovsky Department of the All-Russian Research Institute of Lake and River Fisheries (new series), 1958. — Vol. 1. — 250 p.[in Russian]
9. Lapin S. A. Specifika formirovanija zon povyshennoj produktivnosti v Obskom jestuarii [Specifics of High Productivity Zones Formation in the Ob Estuary] // *Sreda obitanija vodnyh biologicheskikh resursov. Trudy VNIRO* [Aquatic Biological Resources Habitat. Transactions of VNIRO]. — Moscow, 2014. — Vol. 152. — P. 146–153.[in Russian]
10. Otchet Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo hozjajstva i okeanografii za 2024 god (Tjumenskij filial) [Annual Report of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography for 2024 (Tyumen Branch)]. — Tyumen : FSBSI "VNIRO" ("State Fish Center"), 2024. — 38 p.[in Russian]
11. Davey M. E. Microbial biofilms: from ecology to molecular genetics / M. E. Davey, G. A. O'Toole // *Microbiology and molecular biology reviews*. — 2000. — Vol. 64, № 4. — P. 847–867.
12. Protasov A. A. Perifiton kak jekotopicheskaja gruppirovka gidrobiontov [Periphyton as Ecotopic Grouping of Hydrobionts] // *Journal of Siberian Federal University. Biology*. — 2010. — № 1. — P. 20–56.[in Russian]
13. Forster R. M. Biodiversity-ecosystem function relationship in microphytobenthic diatoms of the Westerschelde estuary / R. M. Forster, V. Creach, K. Sabbe [et al.] // *Marine Ecology Progress Series*. — 2006. — № 311. — P. 191–201.
14. Moss J. A. Stability and change in estuarine biofilm bacterial community diversity / J. A. Moss, A. Nocker, J. E. Lepo [et al.] // *Applied Environmental Microbiology*. — 2006. — № 72. — P. 5679–5688.
15. Dobretsov S. Marine biofilms. Pt. 9 / S. Dobretsov // *Biofouling*. — New Delhi : Aptara Inc., 2010. — P. 123–137.
16. Sharapova T. A. Zooperifiton vnutrennih vodoemov Zapadnoj Sibiri [Zooperiphyton of Inland Water Bodies in Western Siberia] / T. A. Sharapova. — Novosibirsk, 2007. — 167 p. — ISBN 978-5-02-023203-7.[in Russian]
17. Zhangirov T. R. Forward Propagation Neural Network Weighting Analysis as a Model Estimation Method / T. R. Zhangirov, A. B. Krevchik, D. V. Zuev [et al.] // *II International Conference on Neural Networks and Neurotechnologies (NeuroNT)*. — IEEE, 2021. — P. 10–12.
18. Perkov A. S. Peculiarities of regression model design based on neural networks / A. S. Perkov, T. R. Zhangirov, N. Y. Grigoryeva [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — Vol. 1658. — P. 012020.
19. Grigoryeva N. Y. Specific features of feed-forward neural networks application in classification and regression problems in algology / N. Y. Grigoryeva, T. R. Zhangirov, A. A. Liss // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — Vol. 1703, № 1. — P. 012032.
20. D'Alimonte D. Phytoplankton determination in an optically complex coastal region using a multilayer perceptron neural network / D. D'Alimonte, G. Zibordi // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2003. — Vol. 41, № 12. — P. 2861–2868.
21. Mattei F. A depth-resolved artificial neural network model of marine phytoplankton primary production / F. Mattei, S. Franceschini, M. Scardi // *Ecological Modelling*. — 2018. — Vol. 382. — P. 51–62.
22. Millie D. F. Neural net modeling of estuarine indicators: Hindcasting phytoplankton biomass and net ecosystem production in the Neuse (North Carolina) and Trout (Florida) Rivers, USA / D. F. Millie [et al.] // *Ecological Indicators*. — 2006. — Vol. 6, № 3. — P. 589–608.
23. Kilic H. Automata networks as preprocessing technique of artificial neural network in estimating primary production and dominating phytoplankton levels in a reservoir : an experimental work / H. Kilic [et al.] // *Ecological Informatics*. — 2006. — Vol. 1, № 4. — P. 431–439.