

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОД БАРЕНЦЕВА МОРЯ ПО ИНДЕКСАМ ТРОФНОСТИ В МЕСТАХ БАЗИРОВАНИЯ АКВАКУЛЬТУРНОГО ХОЗЯЙСТВА МЕТОДАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

П. Н. Скуратова, Л. Н. Хасанова, С. А. Мусина

Уфимский университет науки и технологий (Уфа, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 27 июля 2025 г.

Для цитирования

Скуратова П. Н., Хасанова Л. Н., Мусина С. А. Комплексная оценка качества вод Баренцева моря по индексам трофности в местах базирования аквакультурного хозяйства методами дистанционного зондирования // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 1.

Обоснована возможность применения открытых данных о гидрохимических показателях со спутниковых систем. Установлен сезонный пик эвтрофикации акваторий Баренцева моря и выявлена сильная корреляция уровня трофности с концентрацией хлорофилла а, общего фосфора и минеральных форм азота. Показаны ограниченная применимость индекса трофического уровня TLI для арктических вод и высокая согласованность индексов трофического состояния TSI и трофности E-TRIX, что создает научную основу для их комплексного применения в целях экологически устойчивого развития садковой аквакультуры. Полученные результаты важны для разработки системы мониторинга и природоохранных мероприятий в арктическом регионе.

Ключевые слова: аквакультурная деятельность, Арктика, арктические экосистемы, Баренцево море, биологическая продуктивность, дистанционное зондирование, изменение климата, индекс трофности, корреляция.

Введение

Аквакультурная и марикультурная деятельность способствует обеспечению продовольственной безопасности и стимулированию экономического роста в современном мире, одновременно выступая важным механизмом сохранения и реабилитации водных экосистем. В частности, искусственное разведение рыбы и моллюсков снижает нагрузку на природные популяции, минимизируя риски их чрезмерной эксплуатации в морских условиях. Однако интенсификация аквакультурного производства сопряжена с негативными экологическими эффектами, включая усиленное эвтрофирование водных объектов.

Эвтрофикация угрожает устойчивости многих водных объектов. Тенденция «цветения» вод более выражена в последние десятилетия под влиянием

увеличения антропогенного поступления таких веществ, как аммоний, нитраты, органические формы азота и органофосфаты [1]. Одним из рисков этого явления, обусловленного аквакультурой, является избыточное внесение корма. Поступление большого количества биогенных элементов и легкоокисляемой органики может привести к разрастанию водных растений и водорослей, что способствует ухудшению качества воды и нарушению баланса экосистемы [2]. Именно поэтому при ведении аквакультурного хозяйства необходимо поддерживать оптимальные параметры водной среды, а также вести постоянный мониторинг в целях предотвращения необратимых негативных последствий.

Информация о трофическом статусе водного объекта дает представление о современной структуре и функционировании экосистемы [3]. Традиционно качество воды определяется с помощью полевых

измерений и лабораторного анализа. Такой подход наиболее точен, однако требует определенного количества времени и финансовых затрат. Альтернативный метод — дистанционное зондирование с применением спутников. Технологии дистанционного зондирования обладают такими преимуществами, как высокая точность и большой диапазон времени, что нашло широкое применение при мониторинге концентрации хлорофилла *a* и химических параметров воды, а именно общего фосфора, азота и др. [4]. Использование данных о компонентах трофического состояния водоемов обеспечивает оценку их качества через применение индексов трофности, что создает научную основу для планирования природоохранных мероприятий в целях обеспечения устойчивого развития аквакультурного производства.

Особую актуальность приобретает исследование трофического статуса арктических морских вод. Этот регион имеет значительную экономическую ценность в связи с интенсивной эксплуатацией рыболовных ресурсов, оказывающей существенное влияние на гидрохимические показатели водной среды [5]. При этом арктическая экосистема демонстрирует повышенную чувствительность к текущим климатическим изменениям, что усиливает необходимость ее комплексного мониторинга. Существует много аспектов глобального потепления в Арктике, которые так или иначе оказывают значительное влияние на трофическое состояние вод: рост температуры приводит к изменению гидрологических условий и увеличению стока пресной воды в моря, что может способствовать накоплению питательных веществ, а выбросы углекислого газа вызывают подкисление воды, что также оказывает негативный эффект как на химический состав воды, так и на обитателей морской фауны [6; 7]. Таким образом, спутниковый мониторинг трофического статуса арктических морей представляет собой эффективный инструмент исследования, сочетающий оперативность получения данных с возможностью масштабного анализа акваторий в условиях глобальных климатических трансформаций.

Одним из субъектов Федерации, побережье которых омывается арктическими водами и характеризуется наличием активной аквакультурной деятельности, является Мурманская область. Рассмотрим функционирующие садковые комплексы, расположенные в водах Баренцева моря и специализирующиеся на выращивании арктической форели и атлантического лосося: Восточный рукав Губы Ура («Шалим» и «Червяное озерко»), Титовка, Кислуха. Выбор участков обусловлен их географическим положением, рельефом дна и течениями. Таким образом, основная цель настоящей работы — комплексная оценка экологического состояния акваторий садковых хозяйств Баренцева моря на основе анализа трофических индексов с применением технологий спутникового мониторинга и определение

возможности их совместного использования для получения более точных результатов и разработки мероприятий по охране водных экосистем. Были решены следующие задачи: во-первых, морфологически и географически охарактеризован каждый из участков, во-вторых, описаны методы дистанционного зондирования и расчета трофических индексов, в-третьих, выполнены расчеты и сделаны соответствующие выводы, а также предложены необходимые мероприятия по поддержанию состояния водных экосистем в условиях эксплуатации аквакультурного хозяйства.

Область исследований

Губа Ура представляет собой один из заливов на северном побережье Кольского полуострова Баренцева моря. Это одна из самых крупных губ данного района. Она характеризуется общим северо-восточным простиранием, крутыми, обрывистыми берегами, абсолютные высокие отметки которых достигают 200 м. Природа существования этой зоны складывается из двух основных факторов: циркуляции вод и особенностей донной топографии. Факторы малой глубины на входе и выходе из рукава (около 20 м) и прогиб дна до 120 м в центральной части формируют уникальные особенности циркуляции и трансформации вод. Рельеф дна, имеющий седловидную форму, создает условия, при которых поступающие воды в Восточный рукав над впадиной в центральной его части вовлекаются в вихревое циклоническое движение, при котором происходит подъем донных водных масс [2].

Губа Титовка находится на Мурманском берегу Баренцева моря и вдается в северо-западную часть берега Мотовского залива. Открыта к северу, вдается в материк на 6 км, имеет ширину у входа 2,8 км, средняя глубина — 82 м. В губу впадают река Титовка и несколько ручьев. Глубина залива постепенно уменьшается к вершине губы, которая осыхает в отлив на 2 км в длину [8].

Губа Кислуха располагается неподалеку от губы Титовка и как залив Баренцева моря подвержена воздействию приливов и отливов, что оказывает влияние на гидрологический режим этой области. Зона вдается в материк на 2 км, имеет ширину у входа 0,7 км, средняя глубина — 70 м.

Садковый комплекс 1 находится на рыбоводном участке Восточный рукав губы Ура («Шалим»), Баренцево море, площадью 40 га. Садковый комплекс 2 находится на участке Восточный рукав губы Ура («Червяное озерко»), Баренцево море, площадью 185 га. Садковый комплекс 3 находится на рыбоводном участке губа Титовка Мотовского залива, Баренцево море, площадью 270 га. Садковый комплекс 4 находится на рыбоводном участке губа Кислуха, Баренцево море, площадью 118 га (рис. 1).

Границы участков (система Nakarte.me (<https://nakarte.me/#m=8/49.73868/33.45886&l=O>) координат WGS-84) определены координатами, представ-

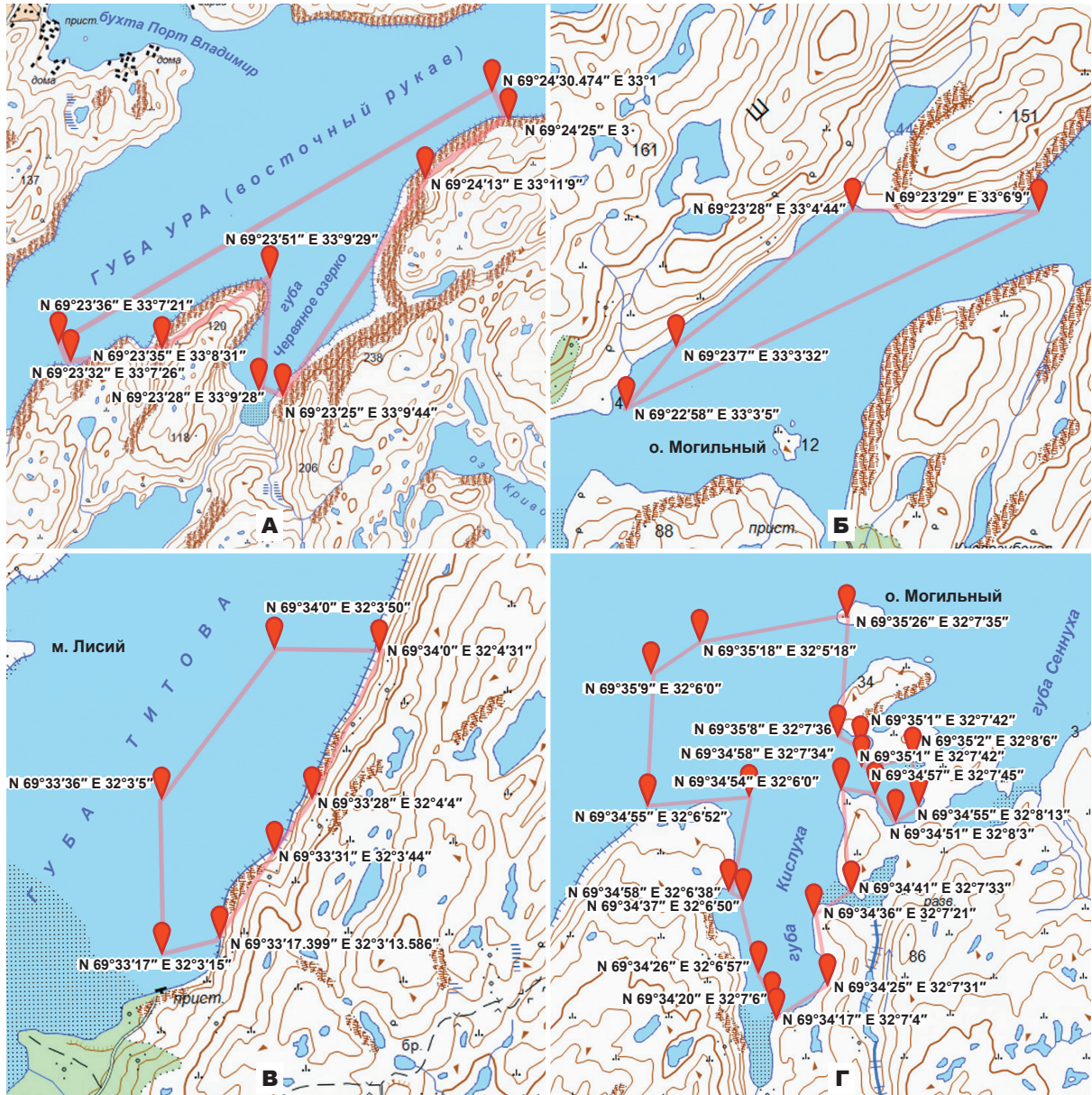


Рис. 1. Садковые комплексы: А – восточный рукав губы Ура «Червяное озеро», Б – восточный рукав губы Ура «Шалим», В – губа Титовка, Г – губа Кислуха. Составлено авторами на картографической основе Nakarte.me (<https://nakarte.me/#m=8/49.73868/33.45886&l=0>)

Fig. 1. Location of cage complexes: А – eastern arm of the Ura Bay “Worm Lake”, Б – eastern arm of the Ura Bay “Shalim”, В – the Titovka Bay, Г – the Kislukha Bay. Compiled by the authors on a cartographic basis Nakarte.me (<https://nakarte.me/#m=8/49.73868/33.45886&l=0>)

ленными на рис. 1. Описание границ — последовательное соединение точек прямыми линиями по акватории водного объекта.

Материалы и методы исследований

Дистанционная оценка трофического состояния исследуемых территорий

Дистанционная оценка трофического состояния водных объектов позволяет эффективно отмечать изменения в экосистемах водоемов, выявлять загрязнения и оценивать состояние биологических веществ. Существует много спутниковых систем

для отслеживания основных биохимических компонентов, характеризующих качество акваторий: GOCI (Geostationary Ocean Color Imager), Sentinel-2, Landsat, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и др. В рамках настоящего исследования была принята система MODIS, поскольку она предоставляет открытый доступ к спутниковым данным, что обеспечивает методологическую и экономическую эффективность анализа.

MODIS — спектрорадиометр с визуализацией среднего разрешения. Это основной прибор на борту спутников Aqua (EOS PM) и Terra (EOS AM).

Спутник Aqua имеет орбиту с юга на север через экватор днем. Данный спутник просматривает всю поверхность Земли каждые два дня, данные собираются в 36 спектральных диапазонах. Система MODIS имеет большое значение для понимания глобальных процессов, происходящих на всей поверхности планеты, а также в океанах и нижних слоях атмосферы.

Наиболее часто используемыми методами оценки трофического состояния поверхностных вод являются индекс трофического состояния TSI, индекс трофического уровня TLI и индекс эвтрофикации E-TRIX. Их сходство заключается в переводе биологических, физических и химических параметров воды в непрерывную величину, пригодную для оценки трофического состояния водоема. Для более эффективного изучения трофического состояния водоемов перечисленные индексы были рассчитаны при помощи программного комплекса «Калькулятор трофности», разработанного авторами статьи [9].

Оценка биогенного состояния водного объекта на основе модели дистанционного зондирования Земли с индексом трофического состояния TSI

Индекс трофического состояния TSI, разработанный Карлсоном (1977 г.) и модифицированный Толедо (1983 г.) [10], рассчитывается по следующим гидроэкологическим показателям: концентрация в воде хлорофилла *a* Chl *a*, общий фосфор TP и прозрачность воды по диску Секки SD. Карлсон предложил формулы расчета индекса по каждому из этих показателей, и каждый вариант расчета индекса самостоятелен и служит численной мерой выражения трофического статуса водного объекта [11]. Фактически это формулы, описывающие логарифмические кривые изменения индекса [12]:

$$TSI_{SD} = -14,388 \ln(SD) + 59,909,$$

где TSI_{SD} — индекс трофности, рассчитанный по значениям SD, м;

$$TSI_{TP} = 14,427 \ln(TP) + 4,1504,$$

где TSI_{TP} — индекс трофности, рассчитанный по содержанию TP, мг/м³;

$$TSI_{Chl\ a} = 9,7552 \ln(Chl\ a) + 30,913,$$

где $TSI_{Chl\ a}$ — индекс трофности, рассчитанный по содержанию Chl *a*, мг/м³.

В качестве интегрированного значения берется среднее из трех рассчитанных индексов трофности по формуле

$$TSI = \frac{TSI_{SD} + TSI_{TP} + TSI_{Chl\ a}}{3}.$$

Значения TSI можно разделить на четыре уровня: олиготрофный ($TSI < 30$), мезотрофный ($40 < TSI < 50$), эвтрофный ($60 < TSI < 70$) и гиперэвтрофный ($TSI \geq 80$).

Оценка биогенного состояния водного объекта на основе модели дистанционного зондирования Земли с индексом трофического уровня TLI

Индекс трофического уровня TLI является еще одним показателем качества воды. Для его расчета объединяются четыре параметра: концентрация хлорофилла *a* Chl *a*, содержание общего фосфора TP, общего азота TN и прозрачность по диску Секки SD. В отличие от индекса Карлсона TSI данный индекс не является единой методикой определения трофического состояния водоемов. В настоящее время существуют уравнения индекса трофического уровня для акваторий Новой Зеландии и Китая. В данной работе был применен первый вариант, однако нельзя утверждать, что полученные данные будут адекватно отражать изменения в Северном Ледовитом океане, поэтому исследование по сравнению уравнений и подсчету трофности для водных объектов Северного Ледовитого океана приобретает особую важность.

Формулы для расчета индекса трофности [13]:

$$TLI_{SD} = 5,10 + 2,27 \log\left(\frac{1}{SD} - \frac{1}{40}\right),$$

где TLI_{SD} — индекс трофности, рассчитанный по значениям SD, м;

$$TLI_{TP} = 0,218 + 2,92 \log(TP),$$

где TLI_{TP} — индекс трофности, рассчитанный по содержанию TP мг/м³;

$$TLI_{TN} = -3,61 + 3,01 \log(TN),$$

где TLI_{TN} — индекс трофности, рассчитанный по содержанию TN мг/м³;

$$TLI_{Chl\ a} = 2,22 + 2,54 \log(Chl\ a),$$

где $TLI_{Chl\ a}$ — индекс трофности, рассчитанный по содержанию Chl *a*, мг/м³.

В качестве интегрированного значения берется среднее из четырех рассчитанных индексов трофности по формуле

$$TLI = \frac{TLI_{SD} + TLI_{TP} + TLI_{TN} + TLI_{Chl\ a}}{4}.$$

Значения TLI можно разделить на пять уровней: микротрофный ($TLI < 2$), олиготрофный ($2 < TLI < 3$), мезотрофный ($3 < TLI < 4$), эвтрофный ($4 < TLI < 5$) и суперэвтрофный ($TLI \geq 5$).

Оценка биогенного состояния озера на основе модели дистанционного зондирования Земли с индексом эвтрофикации E-TRIX

Индекс эвтрофикации E-TRIX является функцией содержания растворенного кислорода и концентрации общего фосфора, минеральных форм азота и хлорофилла *a* [14]. Для индекса трофности особенно важно измерение концентрации хлорофилла *a* в воде. Хлорофилл *a* — пигмент, содержащийся в растениях и водорослях, который используется

для фотосинтеза. Высокие значения концентрации данного вещества указывают на наличие большого количества фитопланктона и водорослей, что является признаком эвтрофикации.

Согласно [15] индекс эвтрофикации E-TRIX определяется по формуле

$$E - \text{TRIX} = (\lg[\text{Chl } a \cdot \text{D\%O} \cdot \text{TN} \cdot \text{TP}] + 1,5) / 1,2,$$

где Chl *a* — концентрация хлорофилла *a*, мг/м³; D%O — отклонение в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения; TN — концентрация растворенных форм минерального азота, мг/м³; TP — концентрация общего фосфора, мг/м³.

Значения индекса E-TRIX изменяются от 0 до 10. В зависимости от величины E-TRIX воды подразделяются на четыре трофических уровня: низкий (< 4), средний (4—5), высокий (5—6) и очень высокий (6—10) [15].

Данные общего фосфора, минеральных форм азота и хлорофилла *a* для расчетов приняты из открытой спутниковой системы Giovanni (данные SeaWiFS — OBPB SeaWiFS Monthly Global 9-km Products), получены при помощи спутника MODIS-Aqua [16], ориентировочные значения прозрачности

воды по диску Секки взяты из [17], а содержание кислорода из платформы наблюдений Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации¹.

Результаты исследований и обсуждение

Мониторинг основных параметров для расчета индексов трофности был проведен в пределах площадей рыбоводных участков, обозначенных на рис. 1. Координаты исследуемых точек, а также гидрохимические показатели представлены в табл. 1.

Весна и осень — периоды наибольшей активности рыб и других животных, а также прироста водных растений. В эти сезоны питательные вещества, такие как азот и фосфор, поступают в воду в больших количествах, что может привести к росту водорослей и усилению питания рыб. Так, при постоянном освещении (полярный день) скорость роста водных растений выше, чем при фотопериоде 12/12 (свет/темнота). Тем не менее в естественных условиях при постоянном освещении и увеличении температуры воды рост водорослей замедляется, что является проявлением эндогенных ритмов сезонного развития [18]. В связи с этим при исследовании учитывали периоды апрель-май и сентябрь, ноябрь 2023 г.

Таблица 1. Основные гидрохимические показатели исследуемых территорий. Составлено авторами
Table 1. Main hydrochemical indices of the studied areas. Compiled by the authors

Месяц	Chl <i>a</i>	TP	TN	D%O	SD
<i>Восточный рукав губы Ура «Шалим», первая точка (69° 23' 11" N, 33° 03' 42" E)</i>					
Апрель	0,214	1,962	0,183	105,000	18,000
Май	0,991	5,606	0,859	81,300	17,100
Сентябрь	4,729	16,346	4,159	47,550	15,000
Ноябрь	0,757	4,661	0,654	25,500	16,600
<i>Восточный рукав губы Ура «Шалим», вторая точка (69° 23' 23" N, 33° 04' 35" E)</i>					
Апрель	0,595	3,952	0,514	83,200	17,100
Май	1,703	8,119	1,484	69,100	16,500
Сентябрь	7,421	22,257	6,552	38,400	14,800
Ноябрь	0,803	4,853	0,695	21,200	15,300
<i>Восточный рукав губы Ура «Шалим», третья точка (69° 23' 25" N, 33° 05' 20" E)</i>					
Апрель	0,468	3,353	0,404	91,400	17,700
Май	1,652	7,955	1,438	73,700	16,800
Сентябрь	2,369	10,179	2,069	42,500	14,900
Ноябрь	0,734	4,564	0,635	23,400	16,500

¹ Климатические данные в узлах сетки: содержание кислорода. Баренцево море. — URL: http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RIHMIWDC_796¶meter=oxygen&sea=barents. Climatic data in the grid nodes: oxygen content. The Barents Sea. — Available at: http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RIHMIWDC_796¶meter=oxygen&sea=barents. (In Russian).

Продолжение табл. 1

Месяц	Chl <i>a</i>	TP	TN	D%O	SD
<i>Восточный рукав губы Ура «Червяное озерко», первая точка (69° 23' 58" N, 33° 08' 55" E)</i>					
Апрель	0,221	2,006	0,189	99,200	18,200
Май	1,118	6,088	0,970	87,900	17,400
Сентябрь	3,949	14,452	3,463	57,700	16,900
Ноябрь	1,022	5,725	0,886	43,800	17,300
<i>Восточный рукав губы Ура «Червяное озерко», вторая точка (69° 23' 50" N, 33° 09' 56" E)</i>					
Апрель	0,577	3,870	0,498	81,300	17,500
Май	1,808	8,462	1,575	76,500	16,500
Сентябрь	5,495	18,121	4,836	48,400	15,600
Ноябрь	0,879	5,164	0,762	35,700	15,800
<i>Восточный рукав губы Ура «Червяное озерко», третья точка (69° 24' 10" N, 33° 10' 23" E)</i>					
Апрель	0,346	2,726	0,297	85,900	17,800
Май	1,920	8,818	1,675	80,400	16,200
Сентябрь	3,013	12,003	2,638	51,200	16,000
Ноябрь	0,757	4,661	0,654	39,600	17,300
<i>Губа Титовка, первая точка (69° 33' 23" N, 32° 03' 00" E)</i>					
Апрель	0,257	2,224	0,220	100,000	18,100
Май	1,603	7,796	1,395	99,000	17,200
Сентябрь	1,979	9,005	1,726	93,000	17,000
Ноябрь	1,339	6,885	1,165	95,200	17,400
<i>Губа Титовка, вторая точка (69° 33' 36" N, 32° 03' 24" E)</i>					
Апрель	0,613	4,034	0,529	93,200	17,600
Май	2,039	9,191	1,778	89,100	16,400
Сентябрь	1,339	6,885	1,165	82,300	16,700
Ноябрь	1,422	7,176	1,238	91,500	16,900
<i>Губа Титовка, третья точка (69° 33' 44" N, 32° 03' 48" E)</i>					
Апрель	0,544	3,717	0,469	96,700	17,900
Май	2,442	10,391	2,135	87,400	16,100
Сентябрь	2,672	11,058	2,337	96,100	16,000
Ноябрь	0,906	5,272	0,785	97,700	16,800
<i>Губа Кислуха, первая точка (69° 35' 03" N, 32° 06' 24" E)</i>					
Апрель	0,264	2,265	0,227	112,100	17,900
Май	1,187	6,347	1,028	103,000	17,500
Сентябрь	2,593	10,829	2,269	99,200	17,300
Ноябрь	1,339	6,885	1,164	95,000	17,400

Окончание табл. 1

Месяц	Chl α	TP	TN	D%O	SD
Губа Кислуха, вторая точка (69° 34' 47" N, 32° 07' 03" E)					
Апрель	0,991	5,606	0,859	97,300	17,500
Май	2,165	9,574	1,889	92,400	17,000
Сентябрь	12,367	31,583	10,953	81,300	13,200
Ноябрь	1,380	7,033	1,200	87,600	17,300
Губа Кислуха, третья точка (69° 35' 16" N, 32° 07' 08" E)					
Апрель	0,454	3,284	0,391	101,300	17,700
Май	1,853	8,609	1,613	100,100	17,200
Сентябрь	2,231	9,776	1,948	100,000	16,500
Ноябрь	0,879	5,164	0,762	102,400	16,900

Согласно расчетам трофических индексов качество исследуемых водных объектов в основном характеризуется как переходное из олиготрофного состояния в мезотрофное (по индексу трофического состояния TSI) или из низкого в среднее (по индексу трофности E-TRIX) (табл. 2). Средние значения

Таблица 2. Результаты расчета индекса трофического состояния TSI, индекса трофического уровня TLI, индекса трофности E-TRIX в зависимости от сезонов и мест исследуемых зон аквакультуры в районе губы Ура, губы Титовка и губы Кислуха. Составлено авторами

Table 2. Calculation results of the trophic state index TSI, trophic level index TLI, trophicity index E-TRIX depending on the seasons and locations of the studied aquaculture zones in the area of the Ura Bay, Titovka Bay and Kislukha Bay. Compiled by the authors

Месяц	TSI	Уровень трофности	TLI	E-TRIX	Уровень трофности
Восточный рукав губы Ура «Шалим», первая точка (69° 23' 11" N, 33° 03' 42" E)					
Апрель	16,023	Олиготрофный	-4,420	2,006	Низкий
Май	26,302	Олиготрофный	-0,157	3,407	Низкий
Сентябрь	37,168	Мезотрофный	4,293	4,737	Средний
Ноябрь	24,680	Олиготрофный	-0,809	2,725	Низкий
Восточный рукав губы Ура «Шалим», вторая точка (69° 23' 23" N, 33° 04' 35" E)					
Апрель	22,961	Олиготрофный	-1,550	2,919	Низкий
Май	30,015	Мезотрофный	1,373	3,876	Низкий
Сентябрь	40,172	Мезотрофный	5,542	5,099	Высокий
Ноябрь	25,457	Олиготрофный	-0,578	2,716	Низкий
Восточный рукав губы Ура «Шалим», третья точка (69° 23' 25" N, 33° 05' 20" E)					
Апрель	21,225	Олиготрофный	-2,254	2,719	Низкий
Май	29,731	Олиготрофный	1,264	3,869	Низкий
Сентябрь	32,665	Мезотрофный	2,241	4,022	Средний
Ноябрь	24,507	Олиготрофный	-0,926	2,664	Низкий
Восточный рукав губы Ура «Червяное озерко», первая точка (69° 23' 58" N, 33° 08' 55" E)					
Апрель	16,181	олиготрофный	-4,349	2,016	Низкий
Май	27,007	олиготрофный	0,148	3,553	Низкий
Сентябрь	35,407	мезотрофный	3,637	4,631	Средний
Ноябрь	26,447	олиготрофный	-0,090	3,213	Низкий

Месяц	TSI	Уровень трофности	TLI	E-TRIX	Уровень трофности
Восточный рукав губы Ура «Червяное озерко», вторая точка (69° 33' 36" N, 32° 03' 24" E)					
Апрель	22,649	Олиготрофный	-1,668	2,880	Низкий
Май	30,408	Мезотрофный	1,536	3,971	Низкий
Сентябрь	37,954	Мезотрофный	4,651	4,889	Средний
Ноябрь	25,896	Олиготрофный	-0,374	2,993	Низкий
Восточный рукав губы Ура «Червяное озерко», третья точка (69° 33' 44" N, 32° 03' 48" E)					
Апрель	19,553	Олиготрофный	-3,091	2,401	Низкий
Май	30,890	Мезотрофный	1,727	4,048	Средний
Сентябрь	33,897	Мезотрофный	2,975	4,324	Средний
Ноябрь	24,482	Олиготрофный	-0,911	2,884	Низкий
Губа Титовка, первая точка (69° 33' 23" N, 32° 03' 00" E)					
Апрель	17,195	Олиготрофный	-3,929	2,166	Низкий
Май	29,423	Олиготрофный	1,149	3,948	Низкий
Сентябрь	30,858	Мезотрофный	1,742	4,130	Средний
Ноябрь	28,185	Олиготрофный	0,641	3,758	Низкий
Губа Титовка, вторая точка (69° 33' 36" N, 32° 03' 24" E)					
Апрель	23,019	Олиготрофный	-1,511	2,988	Низкий
Май	31,226	Мезотрофный	1,874	4,144	Средний
Сентябрь	28,382	Олиготрофный	0,699	3,705	Низкий
Ноябрь	28,719	Олиготрофный	0,848	3,807	Низкий
Губа Титовка, третья точка (69° 33' 44" N, 32° 03' 48" E)					
Апрель	22,156	Олиготрофный	1,863	2,885	Низкий
Май	32,491	Мезотрофный	2,392	4,313	Средний
Сентябрь	33,113	Мезотрофный	2,647	4,435	Средний
Ноябрь	25,799	Олиготрофный	-0,377	3,387	Низкий
Губа Кислуха, первая точка (69° 35' 03" N, 32° 06' 24" E)					
Апрель	17,423	Олиготрофный	-3,835	2,235	Низкий
Май	27,375	Олиготрофный	0,301	3,668	Низкий
Сентябрь	32,540	Мезотрофный	2,456	4,417	Средний
Ноябрь	28,185	Олиготрофный	0,640	3,757	Низкий
Губа Кислуха, вторая точка (69° 34' 47" N, 32° 07' 03" E)					
Апрель	26,191	Олиготрофный	-0,191	3,472	Низкий
Май	31,445	Мезотрофный	1,987	4,215	Средний
Сентябрь	44,065	Мезотрофный	7,080	5,868	Высокий
Ноябрь	28,413	Олиготрофный	0,732	3,757	Низкий
Губа Кислуха, третья точка (69° 35' 16" N, 32° 07' 08" E)					
Апрель	21,026	Олиготрофный	-2,339	2,726	Низкий
Май	31,372	Мезотрофный	1,544	4,092	Средний
Сентябрь	31,786	Мезотрофный	2,112	4,274	Средний
Ноябрь	25,573	Олиготрофный	-0,467	3,374	Низкий

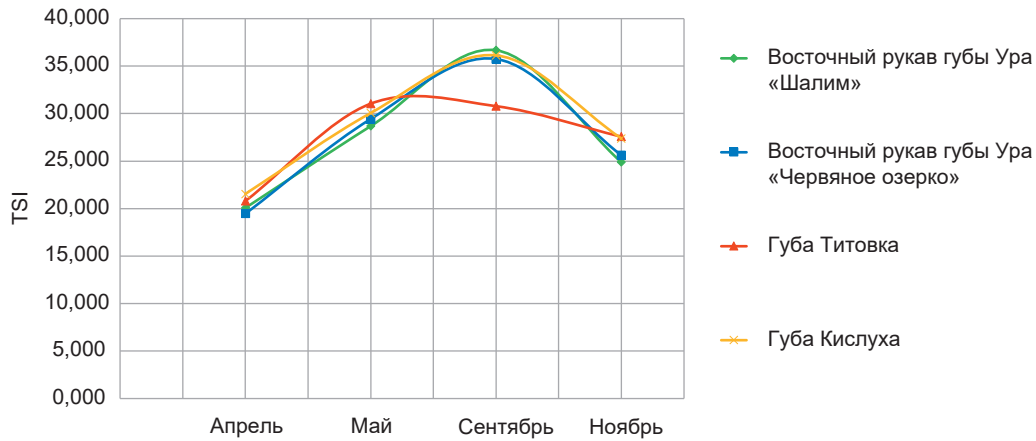


Рис. 2. Изменение среднего значения индекса трофического состояния TSI по месяцам на исследуемых участках. Составлено авторами

Fig. 2. Changes in the mean trophic state index TSI by month in the study areas. Compiled by the authors

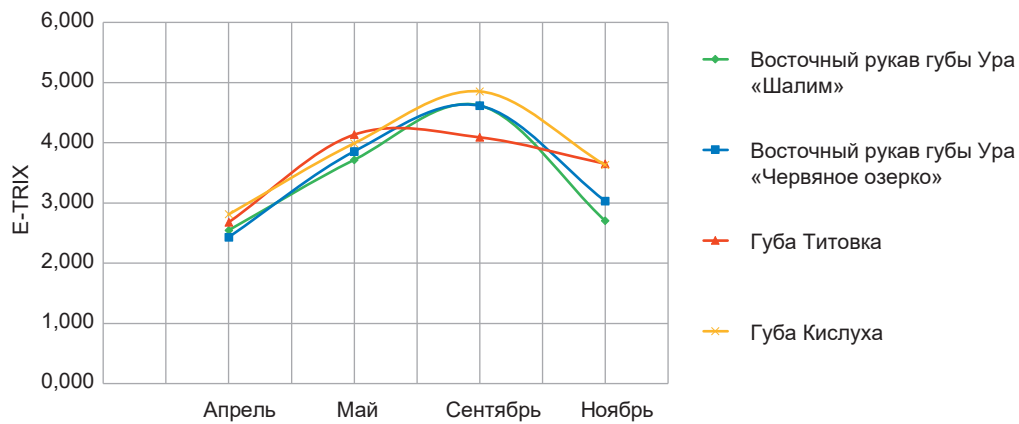


Рис. 3. Изменение индекса эвтрофикации E-TRIX по месяцам на исследуемых участках. Составлено авторами

Fig. 3. Changes in the E-TRIX eutrophication index by month in the study areas. Compiled by the authors

индекса трофического состояния (TSI) для участка в Восточном рукаве губы Ура «Шалим» варьировались от 20,070 (апрель) до 36,668 (сентябрь), для участка в Восточном рукаве губы Ура «Червяное озерко» — от 19,461 (апрель) до 35,753 (сентябрь), для губы Титовка — от 20,790 (апрель) до 31,047 (май), для губы Кислуха — от 21,547 (апрель) до 36,130 (сентябрь).

С временной точки зрения наивысшие значения индекса трофического состояния TSI приходятся на сентябрь, что может быть связано с разрастанием водорослей вследствие увеличения поступления органических веществ, а также с повышением температуры (рис. 2). С пространственной точки зрения наименее подверженной эвтрофикации оказалась губа Титовка, что можно объяснить значительной глубиной и сильными течениями.

Значения индекса E-TRIX подтверждают суждения, основанные на расчете индекса TSI. Средние значения индекса эвтрофикации E-TRIX для участка в Восточном рукаве губы Ура «Шалим» варьировались от 2,548 (апрель) до 4,619 (сентябрь), для

участка в Восточном рукаве губы «Червяное озерко» — от 2,432 (апрель) до 4,615 (сентябрь), для губы Титовка — от 2,680 (апрель) до 4,135 (май), для губы Кислуха — от 2,811 (апрель) до 4,853 (сентябрь) (рис. 3). Однако между результатами расчетов индексов TSI и E-TRIX есть различие: согласно второму в сентябре уровень трофности вод губы Кислуха и участка «Шалим» губы Ура характеризуется не как «средний», а как «высокий», что может быть обусловлено разностью параметров, используемых при вычислении индексов: E-TRIX интегрирует более широкий набор гидрохимических показателей, а его оценочная шкала отличается повышенной строгостью граничных значений. В целом данные индексы рекомендуется использовать совместно для получения более точных результатов в различные периоды.

Индекс трофического уровня TLI, разработанный для вод Новой Зеландии, не смог в полной мере отразить качество вод исследуемых объектов Северного Ледовитого океана вследствие различий географического расположения, климата, состава

вод. Во-первых, воды Новой Зеландии находятся в южном полушарии. Во-вторых, воды Новой Зеландии омываются Тихим океаном и Тасмановым морем, что придает им уникальный состав и свойства. Так, средняя соленость вод составляет примерно 35‰, а температура +19°C. В-третьих, воды Новой Зеландии подвергаются воздействию различных течений, таких как Восточно-Австралийское течение и течение Западных Ветров, что также влияет на их температуру и состав. Воды Северного Ледовитого океана, в свою очередь, подвержены влиянию Нордкапского течения. Именно оно оказывает сильное отепляющее воздействие на климат зон настоящего исследования, влияя на температуру и соленость (температура — около 5°C, соленость — 34‰), что способствует активному фотосинтезу и росту фитопланктона. Поэтому уровень трофности согласно полученным расчетам индекса трофического уровня TLI оценить невозможно (см. табл. 2). Этот способ оценки может быть эффективен при проработке знаний об акваториях Атлантического океана и создании нового вида уравнения.

Влияние аквакультуры на исследуемых участках можно оценить как незначительное, однако во избежание ухудшения состояния водного объекта необходимо проводить определенные мероприятия в летне-осенний период, когда акватория все более подвержена влиянию высоких температур и эвтрофикации. Для сохранения высокого качества воды на местах базирования аквакультурных садков необходимо регулярно проводить мониторинг параметров воды, устанавливать системы фильтрации и очистки, вводить оптимизацию режимов кормления для минимизации остатков корма, внедрять системы рециркуляции, ограничивать плотность посадки рыбы, эффективно управлять сточными водами и соблюдать экологические нормы. Эти меры помогут обеспечить здоровье водных экосистем и устойчивое развитие аквакультуры.

Для Восточного рукава губы Ура, губ Титовка и Кислуха были рассчитаны коэффициенты корреляции Спирмена между индексами трофности и основными гидрохимическими компонентами водной среды: концентрацией хлорофилла *a*, общим фосфором, минеральным азотом, насыщением вод кислородом и прозрачностью воды по диску Секки. Этот метод основывается на рангах, что позволяет выявлять связи даже в случае нелинейных зависимостей, и подходит для порядковых данных, что делает его более эффективным при анализе сложных экосистем.

Для участка, расположенного в Восточном рукаве губы Ура «Шалим», высокие значения для коэффициента корреляции характерны между индексом трофического уровня TLI и всеми его составляющими: концентрацией общего фосфора ($r \approx 1$), концентрацией минерального азота ($r \approx 1$), концентрацией хлорофилла *a* ($r \approx 1$), прозрачностью воды по диску Секки ($r \approx -0,83$). Положительная корреляция означает, что с увеличением упомянутых параметров возрастает и уровень трофности, отрицательная —

что с насыщением питательными веществами водного объекта прозрачность воды уменьшается. Аналогичные значения были получены при расчете коэффициента корреляции для индекса трофического состояния TSI и гидрохимическими показателями, влияющими на него. Что касается связи индекса E-TRIX и его составных параметров, то были получены следующие значения корреляции: для хлорофилла *a* $r \approx 0,91$, для концентрации общего фосфора $r \approx 0,91$, для отклонения в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения $r \approx -0,10$, для концентрации минерального азота $r \approx 0,91$. Низкая отрицательная связь между индексом трофности E-TRIX и отклонением в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения означает, что данный индекс в первую очередь отражает уровень питательных веществ и биомассы в экосистеме.

Для участка, расположенного в Восточном рукаве губы Ура «Червяное озерко», высокие значения коэффициента корреляции характерны между всеми индексами и их составляющими кроме следующих: индекс трофического уровня TLI и прозрачность воды по диску Секки — $r \approx -0,77$, индекс трофического состояния TSI и прозрачность воды по диску Секки — $r \approx -0,77$, индекс трофности E-TRIX и отклонение в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения — $r \approx -0,33$. Высокая отрицательная связь между первыми двумя парами говорит об их связи: с увеличением одного показателя следует снижение другого, и наоборот. Последняя пара характеризуется умеренной отрицательной связью, что аналогично двум первым, но с меньшим влиянием.

Для участка, расположенного на губе Титовка, высокие значения для коэффициента корреляции характерны между индексом трофического уровня TLI и всеми его составляющими: концентрацией общего фосфора ($r \approx 0,80$), концентрацией минерального азота ($r \approx 0,80$), концентрацией хлорофилла *a* ($r \approx 0,80$), прозрачностью воды по диску Секки ($r \approx -0,65$). Умеренная отрицательная связь между индексом трофического уровня TLI и прозрачностью по диску Секки свидетельствует о значительном влиянии данного параметра на трофическое состояние вод. Аналогичные значения были получены при расчете коэффициента корреляции для индекса трофического состояния TSI и гидрохимическими показателями, влияющими на него. Для индекса E-TRIX и его составляющих были получены следующие значения корреляции: для хлорофилла *a* — $r \approx 0,99$, для концентрации общего фосфора — $r \approx 0,99$, для отклонения в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения — $r \approx -0,44$, для концентрации минерального азота — $r \approx 0,99$.

Для участка, расположенного на губе Кислуха, были получены значения, схожие с тремя упомянутыми выше губами. Отрицательная корреляция характерна для индекса трофического уровня TLI

и прозрачности воды по диску Секки ($r \approx -0,73$), индекса трофического состояния TSI и прозрачности воды по диску Секки ($r \approx -0,73$), индекса трофности E-TRIX и отклонения в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения ($r \approx -0,66$).

Таким образом, основным фактором, определяющим уровень трофности вод для Восточного рукава губы Ура («Шалим», «Червяное озерко»), губ Титовка и Кислуха являются концентрации общего фосфора, минеральных форм азота, хлорофилла *a*. Меньшее влияние имеет значение отклонения в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения. Такая закономерность объясняется уникальными гидрологическими особенностями региона. Низкие температуры водных масс способствуют повышенному содержанию растворенного кислорода, в то время как активное перемешивание вод обеспечивает его равномерное распределение. Важно отметить, что в арктических условиях трофический статус в большей степени определяется доступностью биогенных элементов и световым режимом, чем изменениями концентрации кислорода.

На основании полученных результатов можно рекомендовать уделять особое внимание мониторингу биогенных веществ и показателей первичной продукции при оценке экологического состояния водных объектов. Необходимо также учитывать такие ключевые факторы, как освещенность и температурный режим, которые существенно влияют на фотосинтетическую активность и биологическую продуктивность. При разработке специализированных нормативов для арктических акваторий следует принимать во внимание характерные для региона особенности, включая сезонную динамику световых условий и специфические характеристики водных экосистем. Вычисление коэффициента корреляции Спирмена также позволило определить, что результаты, полученные при расчете трех предложенных индексов, коррелируют с высокими значениями связи от $r \approx 0,79$ до $r \approx 1$. Это означает, что индекс трофического уровня TLI, индекс трофического состояния TSI и индекс трофности E-TRIX возможно использовать совместно для получения точных результатов исследований при условии создания нового вида уравнения для расчета индекса трофического уровня.

Заключение

Наибольшие значения индексов трофности для Восточного рукава губы Ура («Шалим» и «Червяное озерко»), губ Титовка и Кислуха наблюдались в основном в сентябре, что, вероятно, связано с активным ростом водорослей из-за роста поступления органических веществ и повышения температуры. С точки зрения пространственного распределения губа Титовка оказалась наименее подверженной эвтрофикации, что можно объяснить ее значительной глубиной и сильными течениями. В то же время

наибольшим уровнем трофности характеризуются губа Кислуха и Восточный рукав губы Ура «Шалим». Высокий уровень трофности согласно индексу трофности E-TRIX наблюдался лишь один раз — в сентябре на рыбоводном участке, расположенном на губе Кислуха.

Ключевыми факторами, определяющими уровень трофности вод Восточного рукава губы Ура («Шалим», «Червяное озерко»), губ Титовка и Кислуха, согласно расчету коэффициента корреляции Спирмена являются концентрации общего фосфора, минеральных форм азота и хлорофилла *a*. В меньшей степени на уровень трофности влияют отклонения абсолютных значений содержания растворенного кислорода от 100%-ного насыщения. На основе полученных данных можно сделать вывод, что аквакультура оказывает незначительное влияние на исследуемые участки. Тем не менее для предотвращения ухудшения ситуации важно контролировать уровень органических веществ, обеспечивая правильное кормление рыб в садковых комплексах в летне-осенний период, когда водоемы наиболее подвержены высоким температурам и эвтрофикации.

Расчет коэффициента корреляции Спирмена также показал, что результаты, полученные при расчете индекса трофического состояния TSI, трофического уровня TLI и индекса трофности E-TRIX, имеют высокую степень корреляции. Однако в отличие от индекса трофического состояния TSI и индекса трофности E-TRIX индекс трофического уровня TLI не может быть использован как самостоятельный инструмент оценки трофности водного объекта, расположенного в акваториях Атлантического океана. В дальнейшем авторы планируют решить задачу проработки знаний о северных водах и создать новый вид уравнения, описывающего трофическое состояние с применением данных дистанционного мониторинга.

В целом исследование демонстрирует высокую эффективность комбинированного применения спутникового мониторинга и расчета трофических индексов для оперативной оценки качества воды в целях устойчивого развития садкового выращивания гидробионтов. Этот метод позволяет в режиме, близком к реальному времени, отслеживать критические сезонные изменения и пространственную неоднородность трофического статуса акваторий, что создает основу для принятия превентивных управленческих решений с учетом арктической специфики.

Литература/Reference

1. Tuygun G. T., Salgut S., Elçi A. Long-term spatial-temporal monitoring of eutrophication in Lake Burdur using remote sensing data. *Water Sci Technol*, 2023, no. 87 (9), pp. 2184—2194. DOI: 10.2166/wst.2023.113.
2. Скуратова П. Н., Хасанова Л. Н., Мусина С. А. Анализ трофического состояния вод губы Ура Мотовского залива, губы Лодейная Кольского залива и Кильдинского пролива Мурманской области с помощью ин-

декса E-TRIX // Рыб. хоз-во. — 2024. — № 1. — С. 26—34. — DOI: 10.36038/0131-6184-2024-2-26-34.

Skuratova P. N., Khasanova L. N., Musina S. A. Analysis of the trophic state of the waters of the Ural Bay, Lodeynaya Bay, Kola Bay and the Kilda Strait of the Murmansk Region using the E-TRIX index. Fisheries, 2024, no. 1, pp. 26—34. DOI: 10.36038/0131-6184-2024-2-26-34. (In Russian).

3. Zhang L., Cheng Y., Niu Y., Jiang J. Analysis and prediction of eutrophication for advanced warning of the water quality concerns in Gaoyou Lake. Water Supply, 2020, no. 20 (1), pp. 186—196. DOI: 10.2166/ws.2019.148.

4. Zhou B., Zhang Y., Shi K. Research progress on remote sensing assessment of lake nutrient status and retrieval algorithms of characteristic parameters. J. of Remote Sensing, 2022, no. 26 (1), pp. 77—91. DOI: 10.11834/jrs.20221232.

5. Новиков А. В. Экономика прибрежных территорий Арктики: анализ состояния и тенденции развития // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 2. — С. 200—210.

Novikov A. V. The economy of the coastal Arctic zones: analysis of the state and development trends. Arctic: Ecology and Economy, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 200—210. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-200-210. (In Russian).

6. Васильцов В. С., Яшалова Н. Н., Новиков А. В. Климатические и экологические риски развития прибрежных арктических территорий // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 341—352.

Vasil'tsov V. S., Yashalova N. N., Novikov A. V. Climate and environmental risks in the development of Arctic coastal territories. Arctic: Ecology and Economy, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 341—352. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-341-352. (In Russian).

7. Макоско А. А., Матешева А. В., Емелина С. В. О тенденциях эколого-климатических рисков для здоровья человека в Арктической зоне России в условиях изменяющегося климата // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 4. — С. 579—589. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-579-589.

Makosko A. A., Matesheva A. V., Emelina S. V. On the trends of ecological and climatic risks to human health in the Arctic zone of Russia in a changing climate. Arctic: Ecology and Economy, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 579—589. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-579-589. (In Russian).

8. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона. — Т. 86. — СПб., 1907.

The encyclopedic dictionary of Brochhaus and Efron. Vol. 86. St. Petersburg, 1907. (In Russian).

9. Программный комплекс оценки экологического состояния водного объекта на основе комплексных трофических индексов: № 2023689019 Рос. Федерация / Мусина С. А., Скуратова П. Н., Хасанова Л. Н.; заявл. 21.12.2023; опублик. 24.01.2024. 1 с.

A software package for assessing the ecological state of a water body based on complex trophic indices: no. 2023689019 Russian Federation / Musina S. A., Skuratova P. N., Khasanova L. N.; published on 12/21/2023; published on 01/24/2024. 1 p. (In Russian).

10. Toledo Jr., Talartico M., Chinez J., Agudo G. The application of simplified models for the evaluation of the eutrophication process in tropical Lakes and reservoirs. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária E Ambiental, 1983, p. 34.

11. Адамович Б. В., Жукова Т. В., Михеева Т. М. и др. Многолетние изменения индекса трофического состояния Нарочанских озер и его связь с основными гидроэкологическими параметрами // Вод. ресурсы. — 2016. — Т. 43, № 5. — С. 535—543. — DOI: 10.7868/S0321059616050023.

Adamovich B. V., Zhukova T. V., Mikheeva T. M., Kovalevskaya R. Z., Lukyanova E. V. Long-term changes in the index of the trophic state of the Naroch lakes and its relation to the main hydroecological parameters. Water Resources, 2016, vol. 43, no. 5, pp. 535—543. DOI: 10.7868/S0321059616050023. (In Russian).

12. Carlson R. E. A trophic state index for lakes. Limnol. Oceanog., 1977, vol. 11, pp. 361—369.

13. Uzun A. Ecogeomorphological Investigation of Anthropogenic Changes in the Kızılırmak River Mouth, Türkiye. Wetlands, 2024, vol. 44, no. 7, p. 83.

14. Слепчук К. А., Хмара Т. В., Маньковская Е. В. Сравнительная оценка уровня трофности Севастопольской и Южной бухт с использованием индекса E-TRIX // Морской гидрофиз. журн. — 2017. — № 5. — С. 67—77.

Slepchuk K. A., Khmara T. V., Mankovskaya E. V. Comparative assessment of the trophic level of Sevastopol and Yuzhnaya bays using the E-TRIX index. Marine Hydrophysical J., 2017, no. 5, pp. 67—77. (In Russian).

15. Журков И. А. Полихеты Северного ледовитого океана. — М.: Янус-К., 2001. — 632 с.

Zhirkov I. A. Polychaetes of the Arctic Ocean. Moscow, Yanus-K., 2001, 632 p. (In Russian).

16. The Bridge Between Data and Science. Available at: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=TmAvMp&starttime=&endtime=&variableFacets=dataFieldDiscipline%3AHydrology%3B>.

17. Сарычева А. В., Колесников Д. В. Подводные беспроводные сети // Scientific studies and modern education. — [Б. м.], 2018. — С. 242—244.

Sarycheva A. V., Kolesnikov D. V. Underwater wireless networks. Scientific studies and modern education. [S. l.], 2018, pp. 242—244. (In Russian).

18. Макаров М. В., Воскобойников Г. М. Влияние освещения и температуры на макроводоросли // Вопр. соврем. альгологии. — 1996. — № 212.

Makarov M. V., Voskoboynikov G. M. The effect of lighting and temperature on macroalgae. Issues of modern algalogy, 1996, no. 212. (In Russian).

Информация об авторах

Скуратова Полина Николаевна, магистр, Уфимский университет науки и технологий (450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), e-mail: polina-skuratova@list.ru.

Хасанова Лиля Науфальевна, магистр, Уфимский университет науки и технологий (450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), e-mail: liyahasanovaa@mail.ru.

Мусина Светлана Айратовна, старший преподаватель, Уфимский университет науки и технологий (450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), e-mail: musinasa@gmail.com.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE BARENTS SEA WATER QUALITY BASED ON TROPHIC INDICES IN AQUACULTURE FARM LOCATIONS USING REMOTE SENSING METHODS

Skuratova, P. N., Khasanova, L. N., Musina, S. A.

Ufa University of Science and Technology (Ufa, Russian Federation)

The article was received on July 27, 2025

For citing

Skuratova P. P., Khasanova L. N., Musina S. A. Comprehensive assessment of the Barents Sea water quality based on trophic indices in aquaculture farm locations using remote sensing methods. Arctic: Ecology and Economy, 2026, vol. 16, no. 1. (In Russian).

Abstract

The study substantiates the possibility of using open data on hydrochemical indicators from satellite systems. It establishes a seasonal peak of eutrophication in the Barents Sea and reveals a strong correlation between the trophic level and the concentration of chlorophyll a, total phosphorus, and mineral forms of nitrogen. The limited applicability of the trophic level index (TLI) to Arctic waters and a high degree of consistency between the trophic state index (TSI) and the trophic index (E-TRIX) have been demonstrated, providing a scientific basis for their integrated use in the context of the sustainable cage aquaculture development. These findings have significant practical implications for the development of monitoring systems and environmental conservation measures in the Arctic region.

Keywords: aquaculture activities, Arctic, Arctic ecosystems, Barents Sea, biological productivity, remote sensing, climate change, trophic index, correlation.

Information about the authors

Skuratova, Polina Nikolaevna, Master, Ufa University of Science and Technology (32, Zaki Validi St., Ufa, Russia, 450076), e-mail: polina-skuratova@list.ru.

Khasanova, Liya Naufalyevna, Master, Ufa University of Science and Technology (32, Zaki Validi St., Ufa, Russia, 450076), e-mail: liyahasanovaa@mail.ru.

Musina, Svetlana Ayratovna, Senior Lecturer, Ufa University of Science and Technology (32, Zaki Validi St., Ufa, Russia, 450076), e-mail: musinasa@gmail.com.