

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И ПРОДУКЦИОННО-ДЕСТРУКЦИОННЫЕ ОТНОШЕНИЯ В ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ

Почепко С.Ю., Каспин М.О., Дмитриев В.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, email: pochepkosofia@gmail.com

Целью исследования является оценка влияния различных факторов на скорости новообразования и разложения органического вещества, моделирование продукционно-деструкционных отношений в водной экосистеме, а также разработка модели-классификации интегральной оценки трофности озера Суури, учитывающей многокритериальность и многоуровневость получения интегральной оценки. В рамках выполнения данной цели авторами решались следующие задачи: 1 – оценка влияния температуры воды, освещенности, концентрации в воде биогенных элементов (аммонийного азота и минерального фосфора) на процессы первичного продуцирования органического вещества в озере Суури (малое озеро в Ленинградской области, район п. Кузнечное) и выявление фактора, лимитирующего образование первичной продукции фитопланктоном летом 2023 г.; 2 – оценка совместного влияния рассматриваемых факторов по моделям Либиха (L-модель), Митчерлиха (M-модель), LM-модели и сравнение полученных результатов; 3 – анализ натуральных наблюдений за продукцией и деструкцией и моделирование продукционно-деструкционных отношений в озере, проверка модели на основе 30 модельных экспериментов; 4 – разработка оценочных шкал и классификации для интегральной оценки трофического статуса водоема; покомпонентная и интегральная оценка трофности. Разработаны две модели-классификации интегральной оценки способности водной экосистемы продуцировать органическое вещество. Рассматриваются параметры оценивания первичной продукции, оценочные шкалы, результаты интегральной оценки. Рассматриваются результаты системных исследований 2021 и 2023 г. ключевого района (оз.Суури) в северо-западном Приладожье по оценке влияния факторов среды на продуцирующую функцию экосистемы; деструкционная способность экосистемы и её деструкционная функция; продукционно-деструкционные отношения в экосистеме озера за 2015-2023 г.), их оценка на основе данных натуральных наблюдений в озере летом (июнь-июль) и на основе моделирования D/P-отношений в экосистеме.. Трофический статус озера по итогам интегральной оценки соответствует левой границе класса мезотрофных вод.

Ключевые слова: фактор, экологические функции, продукция, деструкция, трофический статус, интегральная оценка.

ASSESSMENT OF THE IMPACT FACTORS ON ECOLOGICAL FUNCTIONS AND PRODUCTION-DESTRUCTION PROCESSES IN THE AQUATIC ECOSYSTEM

Pochepko S.Yu., Ovsepyan A.A., Zyryanova D.S., Kaspin M.O., Nemchinova A.V.,
Dmitriev V.V.

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, email: pochepkosofia@gmail.com

The aim of the study is to assess the influence of various factors on the rates of organic matter formation and decomposition, modeling of production-destructive relations in aquatic ecosystems, and to develop a model-classification of the integral assessment of Lake Suuri trophicity, taking into account the multi-criteria and multi-level nature of the integral assessment. In order to achieve this goal the authors solved the following tasks: 1 - assessment of the influence of water temperature, illumination, concentration of biogenic elements (ammonium nitrogen and mineral phosphorus) in water on the processes of primary production of organic matter in Lake Suuri (a small lake in the Leningrad region, near the Kuznechnoye) and identification of the factor limiting the formation of primary production by phytoplankton; 2 - evaluation of the joint influence of the considered factors by the Liebig (L-model), Mitscherlich (M-model) and LM-models and comparison of the obtained results; 3 - analysis of field observations and modeling of production-destruction relations in the lake; 4 - development of evaluation scales for the integral assessment of the trophic status of the water body; component-by-component and integral assessment of trophicity. The results of system studies in 2021 and 2023 of the key area (Lake Suuri) in the northwestern Ladoga region to assess the influence of environmental factors on the producing function of the ecosystem; the destructive capacity of the ecosystem and its destructive function; the production-destructive relations in the lake ecosystem, their assessment based on the data of field observations in the lake in the summer of 2023 and on the basis of modeling of D/P-relations in the ecosystem are considered. Two model-classifications of the integral assessment of the ability of an aquatic ecosystem to produce organic matter are developed. Parameters of primary production assessment, assessment scales, and results of the integral assessment are discussed. The

trophic status of the lake according to the results of the integral assessment corresponds to the left border of the mesotrophic water class.

Key words: factor, ecological functions, production, destruction, trophic status, integral evaluation.

Введение. Для любой водной экосистемы характерны различные процессы массообмена, непрерывно происходящие между её компонентами. Скорости этих процессов определяются множеством условий, из которых важную роль играют абиотические факторы окружающей среды. В настоящее время опубликовано большое количество работ по факториальной экологии, учитывающих влияние отдельных факторов на процессы новообразования и разложения органического вещества. Например, в работах [1, 2] рассматривается зависимость продуктивности водной экосистемы от освещенности и концентрации в воде биогенных элементов. В зарубежных публикациях [3, 4] также описывается влияние температуры, освещенности и концентрации биогенных элементов на величину первичной продукции. Существенным недостатком большинства подобных исследований является то, что в них рассматривается действие одного или нескольких конкретных факторов на процессы массообмена, в то время как в естественной среде наблюдается одновременное действие многих факторов. При этом большие надежды возлагаются на методы биотестирования и на возможности планировать устойчивое (сбалансированное) развитие и коэволюцию природных систем и общества на основе создания моделей функционирования эко- и геосистем. В таких моделях успешность прогнозирования системной динамики во многом зависит от авторского представления о совокупном влиянии естественных и антропогенных факторов на скорости процессов в системе и, прежде всего, продукции и деструкции органического вещества в ней.

По соотношению продукции и деструкции можно понять, какой тип трофии характерен для водоема, какие процессы преобладают в водной экосистеме, способна ли она самоочищаться и справляться с дополнительными нагрузками. В гидроэкологическом мониторинге в настоящее время для ответов на эти вопросы традиционно используется метод светлых и темных склянок для определения величин продукции и деструкции. В конечном счёте соотношение скоростей продукции и деструкции является индикатором продукционно-деструкционного баланса экосистемы водоема, оценка которого представляется еще одной актуальной задачей современности. В большинстве работ для подобных оценок чаще используется покомпонентный анализ, например, в [5] выводы о статусе водоема делаются только на основании величины биогенной нагрузки, содержания биогенных элементов и концентрации хлорофилла. С увеличением числа используемых параметров растет и неоднозначность интерпретации полученных результатов, так как использование разных параметров или большого числа оценочных шкал разных авторов позволяет отнести

изучаемый водоём к разным классам. Решением этой проблемы является разработка шкал интегральных показателей, позволяющих выполнить оценку по большому числу параметров или по нескольким группам параметров и нескольким уровням оценивания. Несколько этапов свертки показателей, агрегированных в отдельные группы, содержащие небольшое количество слабо коррелируемых критериев, позволяют устранить мультиколлинеарность и сгладить влияние отдельных сильно отличающихся от основной массы факторов.

Целью исследования является оценка влияния различных факторов на скорости новообразования и разложения органического вещества, а также разработка модели-классификации для интегральной оценки трофности, учитывающей многокритериальность и многоуровневость получения интегральной оценки. Задачи: 1 – учет влияния температуры, освещенности, концентрации биогенных элементов на процессы первичного продуцирования органического вещества в озере Суури и выявление фактора, лимитирующего образование первичной продукции фитопланктоном; 2 – оценка совместного влияния факторов по моделям Либиха, Митчерлиха и ЛМ-модели и сравнение полученных результатов; 3 – анализ натурных наблюдений и моделирование продукционно-деструкционных отношений в озере; 4 – покомпонентная оценка, разработка моделей интегральной оценки трофического статуса водоёма.

Материалы и методы. Количественная оценка влияния температуры, освещенности, биогенных элементов на величину первичной продукции осуществлялось на основе данных, собранных в ходе полевой практики студентов Института наук о Земле СПбГУ (кафедра Гидрологии суши) на учебно-научной базе СПбГУ «Приладожская» в районе п. Кузнечное (Ленинградская область) в июне 2023 года.

Оценка влияния абиотических факторов на скорости трансформации органического вещества в водной экосистеме выполнялась для температуры, освещенности и концентрации биогенных элементов, в число которых вошли минеральный (аммонийный) азот и минеральный фосфор. Связь между температурой воды и максимальной удельной скоростью роста фитопланктона при условии непрерывного освещения устанавливалась для смеси фитопланктона по формуле Eppley [6] или только для диатомового фитопланктона, преобладавшего в озере Суури по формуле Lehman (1975) при условии, что $t > t_{Fi}^{onm}$ ($t_{Fi}^{onm} = 15^{\circ}\text{C}$):

$$f_{Fi}(t) = (a_{Fi} \cdot \ln V_{Fi} + b_{Fi}) \cdot \exp\left(-\alpha_{Fi} \left(\frac{t - t_{Fi}^{opt}}{t_{Fi}^{max} - t_{Fi}^{opt}}\right)^2\right), \quad (1)$$

для диатомовых: $a_{Fi} = -0,298$, $\alpha_{Fi} = 2,3$, $V_{Fi} = 1500 \text{ мкм}^3$, $b_{Fi} = 4,324$.

Оценка влияния освещенности (функция $f(I)$), осуществлялась на основе формулы Дж. Стила [6]. Также была рассчитана обратная ей функция $1/f(I)$, которая показывает, во сколько раз недостаток света в воде снижает максимальную удельную скорость роста фитопланктона.

Величина лимитации первичной продукции аммонийным азотом $f(N)$ и минеральным фосфором $f(P)$ выполнялась по модели Михаэлиса-Ментен-Моно [6]. Все расчёты выполнялись на основании средних, максимальных и минимальных значений концентраций, полученных во время проведения суточной станции и в ходе съёмки озера. Совместный учет влияния температуры, освещенности, биогенных элементов осуществлялся на основании моделей Либиха (Л-модель), Митчерлиха (М-модель), а также ЛМ-модели (табл. 1).

Таблица 1. Используемые модели для совместного учёта влияния факторов

Вид модели	Вид функции
Л-модель	$\mu_F = f(t) \cdot \min\{f(I), f(N), f(P)\}$
М-модель	$\mu_F = f(t) \cdot f(I) \cdot f(N) \cdot f(P)$
ЛМ-модель	$\mu_F = f(t) \cdot f(I) \cdot \min\{f(N), f(P)\}$

Для изучения скоростей продукции и деструкции использовался метод светлых и темных склянок, которые экспонировались в течение одних суток в свободном от макрофитов открытом районе в центре озера с наибольшими глубинами (около 5 м). Наблюдения проводились в течение 7 суток, при этом использовались ёмкости объема 0,25, 0,5 и 2 л. Сравнение полученных результатов должно было доказать, что величина суточной продукции и деструкции зависит от экспонируемого объема воды.

Продукционно-деструкционное отношение рассчитывалось по модели:

$$\frac{D}{P} = \frac{R_F + R_Z + R_B}{P} \quad (2)$$

где R_F, R_Z, R_B – скорость трат на обмен фитопланктона, зоопланктона и бактерий соответственно ($\text{мгО}_2/\text{л}\cdot\text{сут}$); P – валовая первичная продукция ($\text{мгО}_2/\text{л}\cdot\text{сут}$). Алгоритм расчета этих скоростей подробно рассмотрен в других наших публикациях, например, в [6].

Для определения продуцирующей функции озера Суури в июне 2023 года использовался покомпонентный анализ и интегральная оценка. Для этого было отобрано 11 критериев, которые были разделены на три группы, в состав которых вошли гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические параметры. Одновременно было введено 5 классов трофности. Для каждого критерия была сформирована оценочная шкала. При выборе шкал мы ориентировались на авторские шкалы или вносили в них небольшие изменения (осреднение, интерполяция, экстраполяция) для их соответствия пяти классам трофности. При разработке шкал для субиндексов и шкалы последнего уровня свертка показателей осуществлялись для

левой и правой границ класса внутри каждой группы (первый уровень свертки), а затем полученные значения шкал для субиндексов осреднялись для получения итоговой шкалы интегрального показателя (второй уровень свертки).

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты расчётов максимальной удельной скорости роста планктонных водорослей по данным наблюдений за температурой воды в поверхностном горизонте по разным формулам показывает, что и средняя, максимальная и минимальная температуры воды влияют на f_{Fi} , рассчитанную по формуле 2, сильнее, чем по формуле 1 (табл. 2).

Таблица 2. Максимальная удельная скорость роста фитопланктона по данным наблюдений на суточной станции в 2023 г.

Таксоны фитопланктона	$f_{Fi}(t)$		
	$t_{min} = 20,8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_{cp} = 20,8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_{max} = 20,8\text{ }^{\circ}\text{C}$
1. Диатомовые (по формуле Lehman (1))	0,99	0,76	0,57
2. Агрегированный (по формуле Eppley [6])	2,43	2,57	2,72

При оценке зависимости удельной скорости роста диатомового фитопланктона от освещенности были получены схожие результаты для суточной станции и съёмки озера по средним, максимальным и минимальным величинам прозрачности (табл. 3).

Таблица 3. Зависимость удельной скорости роста диатомовых планктонных водорослей от величины освещенности в 2023 г.

Суточная станция			Съёмка озера		
Прозрачность, м	$f(I)$	$1/f(I)$	Прозрачность, м	$f(I)$	$1/f(I)$
$H_{min} = 2,81$	0,62	1,60	$H_{min} = 2,70$	0,63	1,59
$H_{cp} = 2,70$	0,63	1,59	$H_{cp} = 2,74$	0,62	1,59
$H_{max} = 2,90$	0,62	1,61	$H_{max} = 2,80$	0,63	1,59

Полученные значения $1/f(I)$ позволяют сказать, что недостаток освещенности в среднем в 1,60 раза уменьшает максимальную удельную скорость роста диатомового фитопланктона. Такое уменьшение объясняется эффектом самозатенения фитопланктона в верхнем слое толщи воды.

Для расчета зависимости скорости новообразования органического вещества от количества биогенных элементов по модели Михаэлиса-Ментен-Моно была взята средняя для горизонтов 0, 1 и 2 м концентрация аммонийного азота и минерального фосфора. Полученные для суточной станции и съёмки озера результаты отличаются незначительно (табл. 4). Вместе с тем, можно однозначно сказать, что недостаток азота уменьшает величину первичной продукции в среднем в 1,34 раза, а недостаток фосфора – в 2,80 раза, то есть лимитирующим биогенным элементом является минеральный фосфор.

Таблица 4. Зависимость удельной скорости роста диатомовых водорослей от концентрации биогенных элементов

Вид работ	PO ₄ , мгP/л	NH ₄ , мгN/л	$f(P)$	$f(N)$	$1/f(P)$	$1/f(N)$
Суточная станция	0,01	0,081	0,39	0,70	2,59	1,43
Съёмка озера	0,01	0,133	0,33	0,79	3,00	1,26

При совместном учёте влияния вышеназванных факторов по трём моделям (табл.1) было получено, что удельная скорость роста агрегированного фитопланктона в большей степени, по сравнению с диатомовыми водорослями, зависит от основных абиотических факторов. В среднем удельная скорость чистого продуцирования фитопланктона μ_F для агрегированного планктона в 3 раза выше, чем μ_F для диатомовых водорослей (табл. 5). Также необходимо отметить, что согласно М-модели абиотические факторы в два раза сильнее снижают скорость новообразования органического вещества по сравнению с результатами, полученными по Л-модели.

Таблица 5. Удельная скорость роста фитопланктона по Л-, М- и ЛМ-моделям

Фитопланктон	μ_F по Л-модели	μ_F по М-модели	μ_F по ЛМ-модели
Агрегированный	0,92	0,43	0,58
Диатомовый	0,27	0,13	0,17

Для вычисления D/P-отношения было выполнено 19 серий наблюдений, из них после отбраковки было выбрано 15 серий с экспозицией одни сутки, в том числе 9 серий в склянках объемом 0,25 л и 5 серий в склянках других объемов (0,5 л и 2,0 л). По результатам расчётов в 6 сериях в склянках 0,25 л деструкция превосходила величину продукции; в 3 сериях, наблюдаемых 23-24.06.23, D/P-отношение было меньше единицы, что свидетельствовало об активизации продукционных процессов в озере. Подтвердился вывод о том, что величина первичной продукции зависит от объема склянки. Также исследовалось влияние на результат времени экспозиции проб. Так, при определении первичной продукции в склянках 0,25 л автономным волоконно-оптическим измерителем кислорода «Fibox 4 trace» при экспозиции порядка 1 часа в дневное время (12.00) в разных районах озера величина D/P всегда была меньше 1,0 и в зависимости от района озера различалась в 2-4 раза.

Среднее значение D/P-отношения для объема склянки 0,25 л за все наблюдения в 2023 г. составило 2,79, а для различных объемов проб – 2,55. Из этого следует, что с увеличением объема пробы увеличиваются величины продукции органического вещества. Деструкция также растет, и с повышением температуры воды в водоеме темпы деструкции растут быстрее, чем темпы продукции. В июле 2021 года по 8 сериям наблюдений для склянок объемом 0,25 л D/P-отношение в среднем составило 1,86, причем в 50% случаев оно не превышало 1. За период работ на озере в конце июня – июле 2015 -2023 гг. (в 2020 и 2022 гг. исследования не

проводились) было получено, что средняя величина D/P-отношения составила 2,41. Таким образом, данные 2023 г. в целом близки к средним результатам за последние годы.

Для моделирования D/P-отношения в водоеме по (2) нами использовалась модель, подробно описанная в [6 и 7]. Траты на обмен фитопланктона в этой модели составляют долю от чистой первичной продукции фитопланктона. По (2) было выполнено 30 вариантов расчета D/P-отношения. В вариантах использовались: 1 – разные модели расчета удельных скоростей чистого первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном (табл.1); 2 – разные формулы расчета влияния температуры воды на удельную скорость роста фитопланктона, агрегированного – по [6], или с преобладанием в суммарной биомассе одного таксона фитопланктона (диатомовые или зеленые) по формуле (1); 3 – учет возможной недооценки биомассы бактерий в озере, поскольку нами предполагалось, что бактерии, ассоциированные с детритом, составляли примерно 50% от общей биомассы бактерий; 4 – расчеты проводились по данным натурных наблюдений 2023 и 2021 гг.

Результаты сравнения полученных D/P-отношений по данным натурных наблюдений и по данным моделирования показали, что Л-модель + (диатомовые, формула 1) хорошо описывает полученные в наблюдениях результаты в случае преобладания в составе фитопланктона диатомовых водорослей в 2023 г. ($D/P=2,87$) и 2021 г. ($D/P=1,95$). При этом поправки на недооценку содержания в воде бактерий не требуется. Расчеты по М-модели + (агрегированный фитопланктон по [6]) дают в 2023 г. $D/P=2,02$ и 2021 г. $D/P=1,76$, что вполне согласуется с результатами наблюдений за эти годы, также без поправки на биомассу бактерий или с незначительным её увеличением. Другие варианты дают большие расхождения с полученными по наблюдениям значениями D/P.

Оценка трофности озера Суури осуществлялась по двум вариантам покомпонентной оценки и двум моделям-классификациям (M1 и M2). В M1 вошло 4 класса трофности и 10 критериев, не разделенных на группы. По результатам покомпонентного анализа №1 (для критериев M1) было получено, что по 3 критериям озеро относится к олиготрофии, по 6 – к мезотрофии, по 1 – к границе между мезо-и эвтрофией. В модель M2 вошло 5 классов трофности, три группы параметров (всего 11 критериев). Процент совпадения критериев моделей составил 80%. В результате покомпонентного анализа №2 (для критериев M2) было получено, что озеро Суури можно отнести к олиготрофному типу водоемов по 3 критериям, к эвтрофному по 1, к мезотрофии 1 по 4, к мезотрофии 2 по 3. Таким образом, в обоих случаях озеро можно признать мезотрофным водоемом в период проведения летних наблюдений.

Интегральная оценка трофности по M1 была выполнена по 10 критериям оценивания и 4 классам трофности. Шкала приведена в таблице 6. Было установлено, что для озера Суури в

июне 2023 года ИПТ составил 0,230, что позволяет отнести озеро к левой границе мезотрофного класса.

Таблица 6. Шкала интегрального показателя трофности (ИПТ) по М1.

Тип трофии	Олиготрофия	Мезотрофия	Эвтрофия	Гипертрофия
ИПТ	0,00 – 0,14	0,14 – 0,42	0,42 – 0,77	0,77 – 1,00

В модель М2 (рис.1, табл.7) вошло 11 критериев, 5 классов трофности (класс мезотрофных вод был разбит на два: мезотрофия 1 и мезотрофия 2), 2 уровня свертки и 3 группы параметров, учитывающих гидрохимические, гидрофизические и гидробиологические параметры. Свертки показателей на всех уровнях осуществлялись для равновесных условий учета критериев.

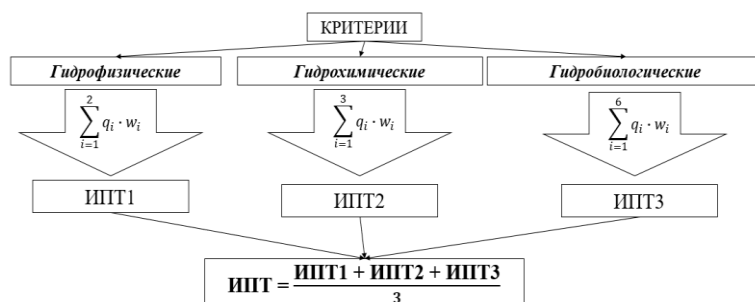


Рис. 1. Схема расчёта интегрального показателя трофности по М2.

Таблица 7. Классификация для интегральной оценки трофности водоема по М2.

№	Критерий	Тип трофии					Примечание
		Олиготрофия	Мезотрофия-1	Мезотрофия-2	Эвтрофия	Гипертрофия	
Гидрофизические критерии							
1	Прозрачность воды по белому диску, Нsd, м	6,8-4,6 0,0-0,344	4,6-3,4 0,344-0,531	3,4-2,3 0,531-0,703	2,3-1,2 0,703-0,875	1,2-0,40 0,875-1,0	Осреднение 5 шкал 1- Gantfrland, 1931 2- Aberg, Roch, 1942 3- Китаев, 1970 4- Henderson-Selers, 1984 5- Volleweider, 1980 6- Р.Э. Карлсон и Дж. Симпсон (1996)
2	Отношение прозрачности Нsd к глубине Н водоема	2,0-1,0 0,0-0,526	1,0-0,70 0,526-0,684	0,70-0,40 0,684-0,842	0,4-0,25 0,842-0,921	0,25-0,10 0,921-1,0	Китаев, 1973, испр.
ИПТ1		0,0-0,435	0,435-0,608	0,608-0,772	0,772-0,898	0,898-1,0	
Гидрохимические критерии							
3	рН при 100% насыщении воды кислородом	6,69-7,35 0,0-0,333	7,35-7,68 0,333-0,500	7,68-8,01 0,500-0,667	8,01-8,34 0,667-0,833	8,34-8,67 0,833-1,0	Цветкова, 1988
4	Концентрация растворенного кислорода в % насыщения	105-95 0,0-0,111	95-75 0,111-0,333	75-50 0,333-0,611	50-25 0,611-0,889	25-15 0,889-1,0	Цветкова, 1988, исправлено
5	БПК ₅ , мгО ₂ /л	2,3-3,3 0,0-0,192	3,3-4,5 0,192-0,423	4,5-5,5 0,423-0,615	5,5-6,5 0,615-0,808	6,5-7,5 0,808-1,0	Цветкова, 1988, исправлено
ИПТ2		0,0-0,212	0,212-0,419	0,419-0,631	0,631-0,843	0,843-1,0	
Гидробиологические критерии							
6	Продукция фитопланктона, мгС/л*сут	0,005-0,05 0,0-0,005	0,05-0,28 0,005-0,029	0,28-0,5 0,029-0,052	0,5-5,0 0,052-0,526	5,0-9,5 0,526-1,0	Гутельмахер, 1986, исправлено
7	Скорость фотосинтеза, мгО ₂ /л сут	0,7-1,0 0,0-0,097	1,0-1,7 0,097-0,322	1,7-2,4 0,322-0,548	2,4-3,1 0,548-0,774	3,1-3,8 0,774-1,0	Цветкова, 1988, исправлено
8	Концентрация хлорофилла «а», С1 «а», мкг/л	0,8-4,2 0,0-0,023	4,2-9,9 0,023-0,059	9,9-15,4 0,059-0,098	15,4-84,0 0,098-0,558	84,0-150,0 0,558-1,0	Осреднение 8 шкал 1- Винберг, 1960 2- Dobsoneetal, 1974 3- Rast Gek, 1978 4- Трифонова, 1979 5- Миллус, Киевск, 1979 6- Бульон, 1983 7- Henderson-Selers, 1984 8- Цветкова и др., 1988 исправлено
9	Разность суточной продукции и деструкции, Ф-Д, мгО ₂ /л сут	0,0-0,1 0,0-0,024	0,1-1,1 0,024-0,268	1,1-2,1 0,268-0,512	2,1-3,1 0,512-0,756	3,1-4,1 0,756-1,0	Цветкова, 1988, исправлено
10	Ср. биомасса фитопланктона в период вегетации, мг/л	0,5-1,0 0,0-0,034	1,0-2,0 0,034-0,103	2,0-3,0 0,103-0,172	3,0-10,0 0,172-0,655	10-15 0,655-1,0	Трифопова, 1979 исправлено
11	Фильтрационная активность зоопланктона, сут ⁻¹	0,05-0,15 0,0-0,080	0,15-0,32 0,080-0,216	0,32-0,50 0,216-0,360	0,50-0,90 0,360-0,680	0,90-1,3 0,680-1,0	Гутельмахер, 1986, исправлено
ИПТ3		0,0-0,044	0,044-0,166	0,166-0,290	0,290-0,658	0,658-1,0	
ИПТ		0,0-0,230 Δ=0,230 0,115	0,230-0,398 Δ=0,168 0,314	0,398-0,564 Δ=0,166 0,481	0,564-0,800 Δ=0,236 0,682	0,800-1,0 Δ=0,200 0,900	

Примечание: в числителе – абсолютные значения параметров, в знаменателе – нормированные значения. В шкале ИПТ 3 строки: в первой строке – левое и правое значение ИПТ для каждого класса; Δ – ширина класса, в последней строке – среднее значение ИП для класса.

В ходе вычисления интегрального показателя трофности было установлено, что по гидрофизическим параметрам озеро относится к мезотрофии-2 (ИПТ1 составляет 0,625), по гидрохимическим и гидробиологическим – к мезотрофии-1 (ИПТ2 и ИПТ3 составляют 0,311 и 0,088 соответственно). Интегральный показатель трофности составил 0,341 (мезотрофия-1, ближе к середине класса). Сравнивая результаты, полученные по М1 и М2, можно отметить, что по обеим шкалам рассчитанный ИПТ для озера Суури соответствует левой части мезотрофного класса трофности (рис. 2).

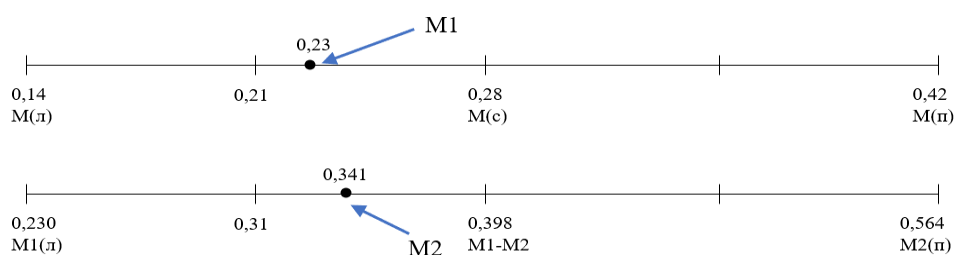


Рисунок 2. Сравнение результатов интегральной оценки трофности оз.Суури по вариантам М1 и М2

Заключение. При оценке влияния факторов на продуктивность водной экосистемы было установлено, что недостаток освещенности снижает скорость образования первичной продукции в 1,6 раза, а лимитирующим биогеном является минеральный фосфор. При совместном учете факторов по трём моделям было получено, что для диатомового фитопланктона удельная скорость роста меньше, чем для агрегированного. Кроме того, по М-модели скорость новообразования органического вещества получается наименьшая, а по Л-модели наибольшая.

По наблюдениям получено, что в среднем в июне-июле скорость деструкции органического вещества превышает скорость продукции в озере в 2,55 раза. С увеличением объема пробы увеличиваются величины продукции органического вещества. Деструкция также растет, и с повышением температуры воды в водоеме темпы деструкции начинают расти быстрее, чем темпы продукции. Результаты моделирования реально описывают наблюдаемые D/P-отношения при использовании Л-модели для диатомового фитопланктона и М-модели для агрегированных микроводорослей. В обоих случаях поправки на возможный недоучёт затрат на обмен бактерий не требуются.

Покомпонентная оценка трофности позволила сделать вывод о том, что по большинству параметров озеро Суури относится к мезотрофному типу. В ходе интегральной оценки по М1 с использованием 10 критериев был получен ИПТ = 0,23, что позволило отнести

озеро к левой части мезотрофного класса. Аналогичные результаты наблюдались при использовании М2 по 11 критериям, ИПТ = 0,34, что соответствует левой части мезотрофного класса. Близость полученных по М1 и М2 результатов убеждает в том, что незначительное расхождение в количестве и составе выбранных оценочных критериев (в пределах 20%) не повлияло на общую оценку трофности водоема.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-27-10011, и при финансовой поддержке Санкт-Петербургского научного фонда.

Литература

1. Нигаматзянова Г.Р., Федорова И.В. Оценка экологического состояния озер оазисов Холмов Ларсеманн и Ширмахера (Восточная Антарктида) // Успехи современного естествознания № 12, 2015, С. 140-144.
2. Кудрявцева Е.А., Буканова Т.В., Александров С.В. Моделирование первичной продукции в юго-восточной части Балтийского моря // Научный журнал «Известия КГТУ», №64, 2022.
3. Aleksandra M. Lewandowska, Petra Breithaupt, Helmut Hillebrand, Hans-Georg Hoppe, Klaus Jürgens, Ulrich Sommer. Responses of primary productivity to increased temperature and phytoplankton diversity. *Journal of Sea Research*, Volume 72, 08/2012, p. 87-93.
4. Daffne C. López-Sandoval, Carlos M. Duarte, Susana Agustí. Nutrient and temperature constraints on primary production and net phytoplankton growth in a tropical ecosystem. *Limnology and Oceanography* Volume 66, Issue 7, 2021, p. 2923-2935.
5. Номоконова В.И., Выхристюк Л.А., Тарасова Н.Г. Трофический статус Васильевских озёр в окрестностях г. Тояльтти. *Известия Самарского научного центра РАН*, том 3, №2, 2001.
6. Сергеев Ю. Н., Кулеш В. П., Дмитриев В. В. Пространственно-неоднородная модель экосистемы эстуария р. Невы. Имитации последствий строительства Санкт-Петербургской дамбы — СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2021. — 310 с. DOI 10.52565/9785911551285
7. Дмитриев В.В., Боброва О.Н., Грачева И.В., Колодкин П.А., Примак Е.А., Седова С.А., Четверова А.А. Мониторинг и моделирование продукционно-деструкционных отношений в водных экосистемах. *Успехи современного естествознания* № 1, 2019, С. 82 – 87.