



Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 4 (54). Декабрь, 2024

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
В. Krasnov
А. Gugotek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>





УДК УДК 574.583

ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ЗООПЛАНКТОНА КРУПНОГО ОЗЕРА

СЯРКИ

Мария Тагевна

кандидат биологических наук, Институт водных проблем Севера КарНЦ
РАН, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50, msyarki@yandex.ru

Ключевые слова:

метод наименьших квадратов
метод минимизации
ортогональных расстояний
траектория сезонной
динамики
временные сдвиги
внутригодовая и межгодовая
изменчивость
фенологические фазы
зоопланктон

Аннотация: Первой реакцией природных систем на климатические изменения являются временные сдвиги сезонных явлений. В работе рассматриваются подходы и методы исследования сезонной динамики зоопланктона с особым вниманием на временную изменчивость. На основе ряда данных по зоопланктону Кондопожского залива Онежского озера (1988–2021 гг.) были проведены анализ и формализация среднесезонных траекторий сезонной динамики величин обилия, а также выявлены фазы сезонного процесса, или фенофазы. Определение траекторий динамики величин производилось методом скользящего среднего и аппроксимацией заданной функцией. Параметры функции определялись регрессионными методами наименьших квадратов (МНК) и минимизации ортогональных расстояний (Orthogonal distance regression, ODR). Показано, что более точным методом является использование ODR. На основе серии моделей среднесезонной сезонной динамики величин был оценен масштаб их внутригодовой и межгодовой изменчивости. Определен масштаб возможных временных сдвигов и введены критерии экстремальности отскакивающих точек. Методом дискриминантного анализа было показано, что в пределах вегетационного периода достоверно существуют четыре фенофазы с характерными особенностями структуры зоопланктона и сроками, отличающимися от календарных сезонов. Информация, полученная различными методами (непрерывного и дискретного подходов), дополняет друг друга. Методы формализации сезонной динамики планктона являются основой для оценки реакции планктона на колебания климатических и антропогенных факторов.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 30 августа 2024 года

Подписана к печати: 10 декабря 2024 года

Введение

В настоящее время проблема изменения климата становится актуальной для всего мира. Особенно ярко климатические изменения проявляются в северных широтах, где темпы потепления превышают глобальные средние значения (Третий оценочный доклад..., 2022). Климатические колебания вызывают многофакторное воздействие на условия среды в пресноводных экосистемах, такие как увеличение температуры воды, продолжительности безледоставного

периода и «биологического лета», изменения уровня воды, термической стратификации, прозрачности, продуктивности и т. п. (Филатов и др., 2012). Подобные процессы отмечаются и для Онежского озера (Крупнейшие озера-водохранилища..., 2015). Так, за 64-летний период произошло смещение среднего срока окончания ледостава на семь суток (Филатов и др., 2020). Изменение термического и гидродинамического режимов оказывает влияние на сезонную динамику всего планктона и отдельных видов, на его

фенологию и продуктивность (Adrian et al., 2006; Jones, 2011; Winder, Schindler, 2004).

В условиях колебания климата становится актуальным изучение реакций водных сообществ и поиск индикаторных показателей, отражающих эти реакции на изменение среды обитания (Калинкина и др., 2017). В последние десятилетия в зоопланктоне Онежского озера наблюдаются сдвиги его весеннего развития на более ранние сроки, а также изменение в соотношении тепловодных и холодноводных видов (Фомина, 2022). Многолетние исследования других крупных водных объектов – Рыбинского (Лазарева, 2010а, 2024), Камского и Воткинского водохранилищ (Tselishcheva, Lazareva, 2021) подтверждают реакцию сообществ зоопланктона на изменение климата.

Форма траекторий сезонной динамики величин планктона является характерной особенностью водоема и может изменяться также при эвтрофировании (Андроникова, 1996; Сярки, Фомина, 2019; Алимов и др., 2013). Различные районы Онежского озера могут рассматриваться как отдельные водоемы, которые имеют характерные особенности в своей сезонной цикличности (Крупнейшие озера-водохранилища..., 2015). В данной работе проведен анализ зоопланктона Кондопожского залива.

Сезонная динамика зоопланктона Онежского озера достаточно хорошо описана (Смирнова, 1972; Куликова и др., 1997; Сярки, 2015). Но отдельные вербальные описания не позволяют провести количественные оценки масштабов межгодовой изменчивости, временных сдвигов и реакции планктона на воздействие различных факторов среды. Ключом к решению этой проблемы может быть формализация сезонных изменений на основе анализа эмпирических данных и общих закономерностей динамики планктона, а также моделирование сезонных процессов.

Цель исследования – проанализировать сезонную динамику зоопланктона различными методами и определить их информационную значимость. На основе результатов провести формализацию сезонных процессов в зоопланктоне Кондопожского залива.

Материалы

Основой для работы послужил многолетний (за вегетационный период с конца мая по конец октября 1988–2021 гг.) ряд данных по зоопланктону центральной части Кондопожского залива (Сярки, Кулико-

ва, 2012). Данные сетных ловов (сеть Джели с размером пор 100 мкм) обрабатывались по стандартной методике (Методические рекомендации..., 1984) и представлены показателями численности и биомассы всего зоопланктона и его основных таксономических групп. Было соблюдено методическое единообразие на протяжении всего периода исследований.

Данные были организованы в матрицу ($n = 38$). Для анализа использовались абсолютные показатели обилия в столбе воды как общего зоопланктона, так и его основных таксономических групп.

Определенную трудность представляет высокая нерегулярность рядов данных из-за различного времени съемок и их количества по годам (от 5 до 1). Для выделения общих сезонных закономерностей и межгодовой изменчивости ряды данных были свернуты по показателю сезонности, т. е. суток с начала года.

Методы

Методология

В основу работы положено представление о зоопланктоне как о сложной системе, совершающей циклические сезонные колебания и подверженной закономерным и случайным воздействиям факторов среды. Для исследования были предложены два подхода: непрерывный и дискретный. Первый заключался в рассмотрении сезонной динамики как непрерывного процесса с общими закономерностями. Формализация состояла в поиске траекторий среднемноголетней сезонной цикличности и представление их в виде модели простого циклического аттрактора. Второй подход заключался в представлении вегетационного периода как череды сменяющихся состояний или фаз, имеющих характерные особенности и различающихся по структуре.

Определение среднемноголетней траектории динамики показателей

Для анализа среднемноголетней траектории сезонной динамики было выбрано три метода: сглаживание рядов (модифицированное скользящее среднее, окно в 7 значений) и аппроксимация заданной функцией методом наименьших квадратов (МНК) и методом наименьших ортогональных расстояний (Orthogonal distance regression, ODR) (Boggs, Rogers, 1990).

Сглаживание модифицированным методом скользящего среднего для нерегуляр-

ных рядов (Сярки, 2013а) является экспресс-методом и позволяет определить основные закономерности и форму сезонных траекторий, провести грубую интерполяцию. Размер шага сглаживания (от 5 до 15) был получен эмпирическим методом подбора и зависел от обеспеченности информацией и регулярности рядов данных. В результате этого метода не получается плавной кривой и функции для расчета ежесуточных величин.

Ранее было показано, что основная форма сезонной динамики показателей представляет собой несимметричную одновершинную кривую с фиксированными концами. Было предложено применить функцию двух сопряженных сигмоидов (1), которая ранее успешно использовалась для исследования и описания сезонной динамики температуры воды в озерах Карелии и некоторых биологических величин (Сярки, Чистяков, 2013; Пальшин, Ефремова, 2005; Сярки, Теканова, 2008):

$$F(x) = b_0 + b_1 \left\{ 1 - \frac{1 - \exp[(x - b_2)b_3]}{1 + \exp[(x - b_2)b_3]} \right\} \left\{ 1 - \frac{1 - \exp[(x - b_4)b_5]}{1 + \exp[(x - b_4)b_5]} \right\} \quad (1),$$

где $F(x)$ – значение исследуемой величины в данный момент времени; x – сутки с начала года; b_0 – минимальное значение функции; b_1 – условный максимум функции; $b_2 - b_5$ – модельные параметры, определяющие форму кривой.

Подбор модельных параметров осуществлялся с помощью двух методов: метода наименьших квадратов (МНК) и метода наименьших ортогональных расстояний (ОДР).

Различие между этими двумя методами заключается в разнице способа расчета остатков: ОДР, в отличие от МНК, минимизирует ортогональные расстояния от точки до ее проекции на функцию или перпендикуляр к ее производной. Форма кривой функции определяет угол наклона ортогональных расстояний, что вызывает появление двух проекций – Δy и Δx . Траектория, найденная методом ОДР, отличается от траекторий, определенных методами МНК.

Было принято, что общая вариабельность ряда данных складывается из внутригодовой, межгодовой и стохастической компонент. Модель описывает закономерные внутригодовые изменения величин, а межгодовая и стохастическая изменчивость выражается в статистике остатков и ее дисперсии. Соотношение общей дисперсии ряда и дисперсии остатков является оценкой адекватности модели. Величина объясненной моде-

лю дисперсии основывалась на статистике изменчивости остатков и оценивалась по коэффициенту детерминации R^2 .

Данные обрабатывались в среде Excel for Windows, R 4.3.2, Past 4.03.

Исследование сезонных состояний зоопланктона или фенофаз

Для выделения в планктоне отдельных сезонных состояний, или фенофаз, использовался дискриминантный анализ. Основой послужила матрица (9 x 38), включающая восемь переменных (численности и биомассы основных таксономических групп зоопланктона: каланоиды, циклопоиды, кладоцеры и коловратки) и одну группирующую переменную. В начале анализа группирующая переменная представляла номер месяца отбора проб. В дальнейшем она была изменена в зависимости от результата анализа и достоверного выделения только четырех групп. В анализе не использовались данные о дате отбора проб зоопланктона.

Вычисления производились в пакете Statistica 7.

Результаты

Для формализации моделей сезонной динамики величин было использовано три метода. Визуальное представление траекторий сезонной динамики, определенное различными методами, показано на рис. 1.

Анализ траекторий среднемноголетней динамики показал, что полученные разными методами модели значительно различаются, особенно в области точек перегиба. Короткий летний период развития зоопланктона в холодноводном Онежском озере и межгодовая изменчивость усложняют определение масштабов пиков. Сглаживание скользящими средними и аппроксимация методом МНК приводят к сглаживанию траектории, искажению ее минимумов и максимумов. Это снижает соответствие моделей ($R^2 = 0.24$ и $R^2 = 0.33$). Лучшим методом был метод ОДР с учетом временных сдвигов ($R^2 = 0.98$).

Кроме того, из-за нелинейного характера функции вектора наименьших ортогональных расстояний имеют две проекции (Δy и Δx). Появление временных сдвигов относительно средней траектории имеет понятные биологические причины. Размах временных колебаний сезонных явлений, таких как сход льда или весенний прогрев воды, может достигать месяца и более (Онежское озеро, 2010), и, естественно, развитие зоопланктона каждый год зависит от текущих условий

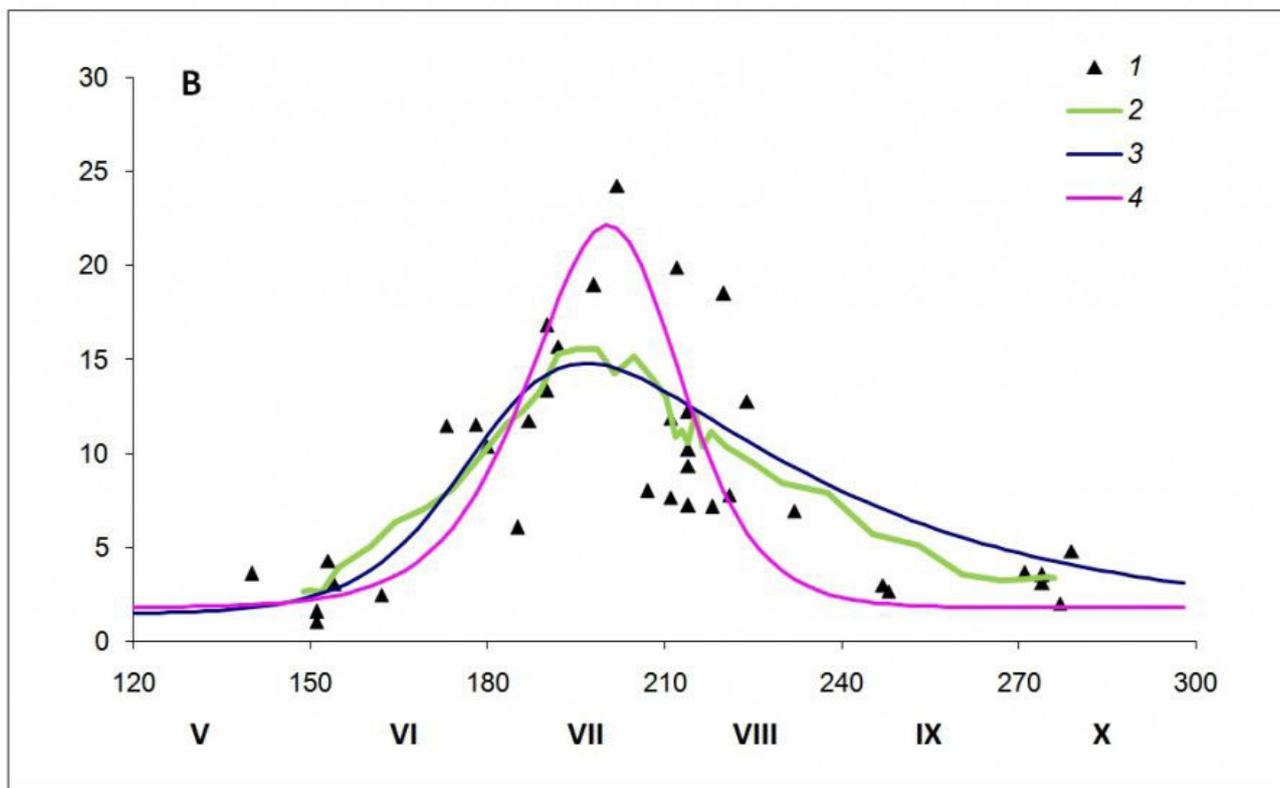


Рис. 1. Траектории сезонной динамики биомассы зоопланктона (B , $г/м^2$): 1 – эмпирические данные, 2 – кривая, сглаженная скользящим средним, 3 – функция МНК, 4 – функция ODR

Fig. 1. Trajectories of zooplankton biomass seasonal dynamics (B , $г/м^2$): 1 – empirical data, 2 – curve smoothed by moving average, 3 – least squares function, 4 – orthogonal distance regression

среды. Естественными являются сдвиги в развитии зоопланктона, при этом наиболее зависимым от скорости прогрева воды периодом развития является раннее лето (на восходящей ветви функции). Анализ статистики временных сдвигов (Δx) данных показал, что доверительный интервал для функции составляет 2–5 суток в зависимости от природы величины.

Анализ остатков и их проекций на осях ординат и абсцисс показал, что большая их часть располагается в пределах $\pm 2SD$ от функции (рис. 2). Некоторые точки, отстоящие от среднесуточных величин более чем на $3SD$, считаются отскакивающими (биомассы зоопланктона в сентябре 1988 и 1991 гг.). Причины таких отклонений могут быть различными и заключаться в синоптической ситуации перед съемкой, поведенческих реакциях рачков, методических ошибках и т. д., их необходимо рассматривать и анализировать отдельно.

Оценка сезонных состояний

Был проведен дискриминантный анализ массива, результат которого показал статистически достоверное выделение четырех групп данных. Группы хорошо распредели-

лись в осях канонического анализа (рис. 3). Первая ось, или корень, была связана с обилием коловраток (коэффициент корреляции -0.36 по численности и -0.49 по биомассе), вторая – с обилием ветвистоусых рачков (коэффициент корреляции 0.46 по численности и 0.57 по биомассе). Оба корня статистически значимы ($p < 0.00001$).

Расположение групп на сезонной шкале показало, что они соответствуют хорошо известным и описанным ранее для зоопланктона сезонам: весна, раннее лето, позднее лето и осень. Но полученные группы не совпали по времени с общепринятыми календарными сезонами, и было предложено считать их фенологическими фазами, или фенофазами. Фенофазы представляют собой чередование естественных состояний зоопланктона, характеризуются закономерными особенностями его структуры, имеют границы и продолжительность.

Соотнесение точек из групп с конкретными датами уловов зоопланктона позволило определить вероятное начало и окончание каждой фенофазы, их продолжительность (рис. 4). Так, не считая отскакивающих точек, летний период для зоопланктона централь-

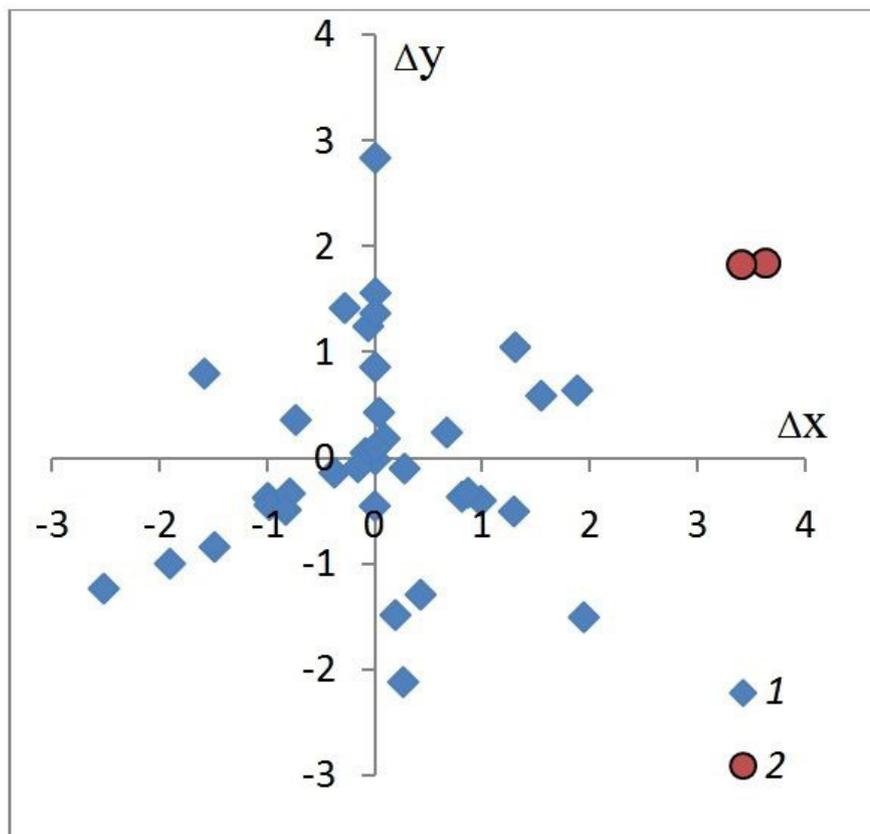


Рис. 2. Распределение ортогональных расстояний и их проекций Δy и Δx , нормированных на стандартное отклонение (SD): 1 – точки внутри интервала $\pm 3SD$, 2 – отскакивающие точки

Fig. 2. Distribution of orthogonal distances and their projections Δy and Δx , normalized by the standard deviation (SD): 1 – points within the $\pm 3SD$ interval, 2 – bouncing points

ной части залива длится 56 суток. Величины сопоставимы с продолжительностью лета в центральной части озера (около 40 суток) и в Петрозаводском заливе (66 суток) (Сярки, 2013б; Фомина, 2022).

Точки, отстоящие от группы более чем на 10 суток, считались экстремально отскакивающими. Подобные отклонения объясняются особыми температурными условиями конкретных лет. Например, высокие температуры весны 2016 г. вызвали раннее прогревание воды и ускоренное развития зоопланктона, что отмечалось также и в других районах озера. Так, в этом году в Петрозаводском заливе зоопланктон перешел в раннелетнее состояние на 20 суток раньше, чем обычно (Фомина, 2022). Состояние зоопланктона 5 июля 1988 г. можно охарактеризовать как переходное, но преобладание в биомассе (>50 %) веслоногих рачков определило весеннее состояние сообщества. Возможно, увеличение доли рачков является случайным событием, следствием стайного поведения и миграции.

Обсуждение

Определение траектории сезонной динамики показателей является одной из основных задач при изучении функционирования зоопланктона в экосистеме. Наличие непрерывной модельной кривой позволяет количественно оценить межгодовую изменчивость данных, определить абсолютные и относительные суточные скорости приростов численности и биомассы, что является еще одним способом оценки продукционного потенциала планктона (Фомина, Сярки, 2016). Траектории сезонной динамики отражают информацию о количественных и качественных изменениях в планктоне. Например, сезонная динамика обилия роторного и рачкового планктона отражает накопление изменений и резкие переходы состояний в процессе эвтрофирования (Сярки, Фомина, 2019).

Совмещение двух подходов в изучении сезонных процессов позволяет получить дополнительную информацию (рис. 5). Так, при анализе описанных данных каждая из

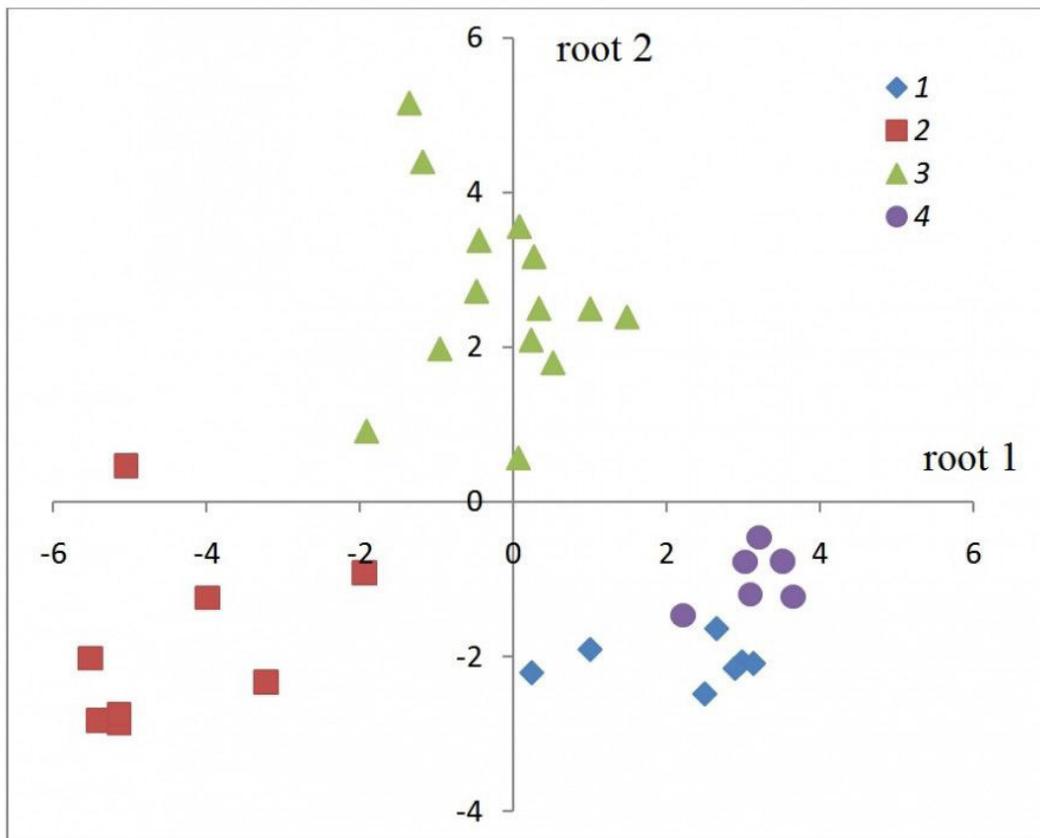


Рис. 3. Распределение четырех групп в пространстве канонических осей. 1–4 – номера групп
 Fig. 3. Distribution of 4 groups in the space of canonical axes. Group numbers 1–4

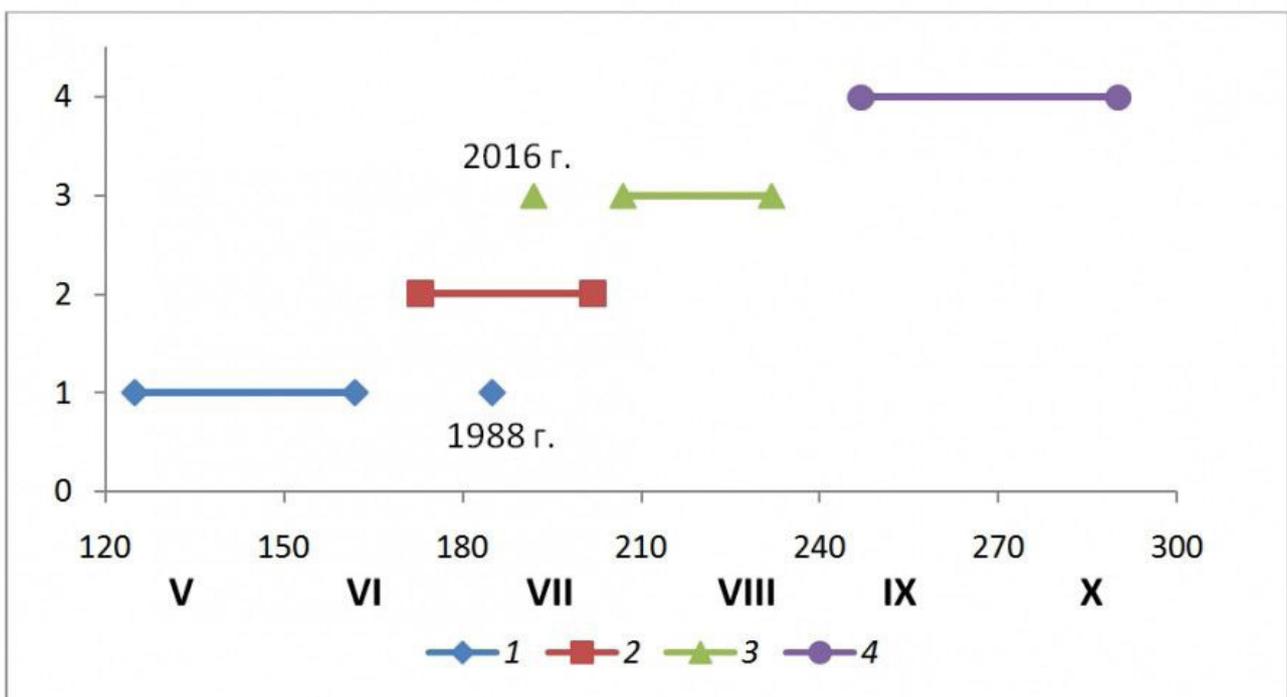


Рис. 4. Продолжительность фенофаз зоопланктона: 1 – весна, 2 – раннее лето, 3 – позднее лето, 4 – осень

Fig. 4. Duration of zooplankton phenophases: 1 – spring, 2 – early summer, 3 – late summer, 4 – autumn

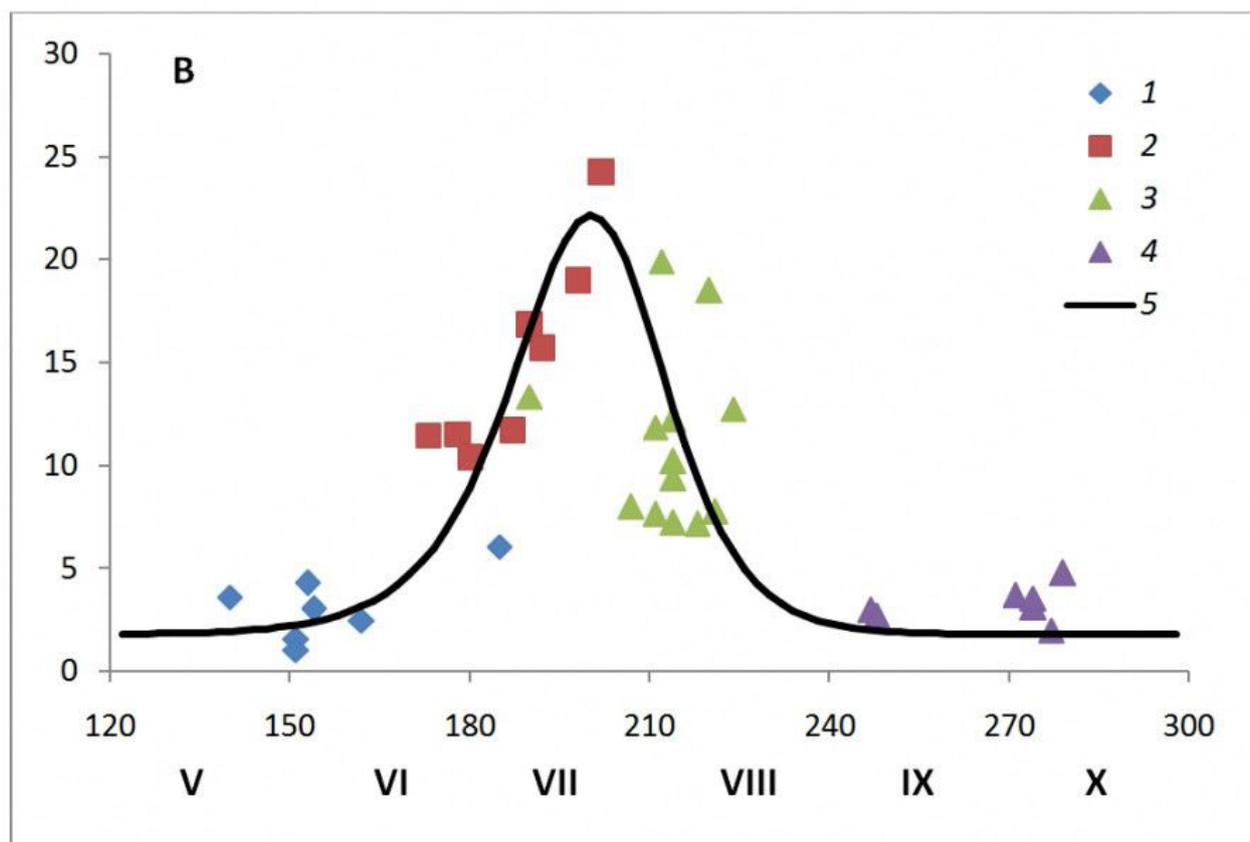


Рис. 5. Среднемноголетняя динамика биомассы зоопланктона (B , $г/м^2$) и распределение фенофаз: 1 – весна, 2 – раннее лето, 3 – позднее лето, 4 – осень, 5 – траектория сезонной динамики биомассы зоопланктона

Fig. 5. Average long-term dynamics of zooplankton biomass (B , $г/м^2$) and distribution of phenophases: 1 – spring, 2 – early summer, 3 – late summer, 4 – autumn, 5 – trajectory of zooplankton biomass dynamics

четырёх фаз соответствовала определённому участку траектории и точки перегиба функции на ней примерно соответствовали времени смены фенофаз. Сезонная динамика общей биомассы зоопланктона закономерно синхронизирована с изменением структуры сообщества. Можно предположить, что полученная разными методами информация отражает реальные процессы в озере.

Ограничения

Существуют ограничения на использование предложенных методов. Если скользящие средние можно применять без ограничений, но при сложной форме траектории этот метод искажает максимумы и минимумы. Аппроксимация предполагается только при наличии единственной средней траектории соответствующей формы для каждого процесса. Если траектория сезонной динамики имеет, например, двухвершинный характер, необходим подбор других функций. Внутригодовая изменчивость или закономерные сезонные процессы должны пре-

обладать над межгодовой изменчивостью. Так, в малых и средних водоемах возможны не просто амплитудные колебания величин, а качественные различия в сезонных процессах в разных ситуациях конкретных лет (Лазарева, 2010б). Выделение фенофаз возможно только при условии, что продолжительность фенофаз больше, чем период их перекрывания, из-за межгодовой изменчивости.

Заключение

Системный анализ и применение различных подходов и методов к исследованию сезонной динамики позволили получить новую информацию даже в условиях высокой нерегулярности рядов данных. Информация, полученная в результате анализа, не противоречит известным ранее сведениям и значительно дополняет их.

Серия моделей описывает среднемноголетние траектории сезонной динамики зоопланктона и значительно снижает их сезонную неопределённость, что позволяет корректно сравнивать данные съёмки раз-

ных сезонов и лет. На их основе представлен метод количественной оценки экстремальности отскакивающих данных, что актуально в условиях колебания климатических факторов.

В годовом цикле зоопланктона были выделены фенофазы, аналогичные фазам сезонной динамики зоопланктона других районов озера. Летние фазы в Кондопож-

ском заливе были продолжительнее, чем в центральной части озера, и короче, чем в Петрозаводском заливе. Исследование сезонной динамики зоопланктона позволяет отслеживать временные сдвиги в развитии сообщества разных районов озера в условиях климатических колебаний и необычных синоптических событий.

Библиография

- Алимов А. Ф., Богатов В. В., Голубков С. М. Продукционная гидробиология. М.: Наука, 2013. 344 с.
- Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем. СПб.: Наука, 1996. 190 с.
- Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т. Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 1. С. 4–18. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-1-1
- Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России. Современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Карельский науч. центр Российской академии наук, Ин-т водных проблем Севера; . Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 375 с.
- Куликова Т. П., Кустовлянкина Н. Б., Сярки М. Т. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1997. 112 с.
- Лазарева В. И. Структура и динамика зоопланктона Рыбинского водохранилища. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010а. 183 с.
- Лазарева В. И. Особенности многолетней (1956–2005 гг.) динамики зоопланктона в Рыбинском водохранилище // Водные ресурсы. 2010б. Т. 37, № 5. С. 590–604.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов в гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция / Под ред. Г. Г. Винберг, Г. М. Лаврентьева. Л.: ГосНИОРХ, 1984. 33 с.
- Минеева Н. М., Лазарева В. И., Поддубный С. А., Законнова А. В., Копылов А. И., Косолапов Д. Б., Корнева Л. Г., Соколова Е. А., Пырина И. Л., Митропольская И. В. Структура и функционирование планктонных сообществ Рыбинского водохранилища в условиях климатических изменений // Биология внутренних вод. 2024. № 1. С. 3–21. DOI: 31857/S032096522 4010018
- Онежское озеро: Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с.
- Пальшин Н. И., Ефремова Т. В. Стохастическая модель годового хода температуры поверхности воды в озерах // Метеорология и гидрология. 2005. № 3. С. 85–94.
- Смирнова Т. С. Планктонные коловратки и ракообразные // Зоопланктон Онежского озера. Л., 1972. С. 126–233.
- Сярки М. Т. Изучение траекторий сезонной динамики планктона с помощью метода двойного сглаживания // Принципы экологии. 2013а. № 1 (5). С. 61–67. DOI: 10.15393/j1.art.2013.2141
- Сярки М. Т. Как долго длится лето для зоопланктона Онежского озера? // Принципы экологии. 2013б. № 4. С. 70–75. DOI: 10.15393/j1.art.2013.2781
- Сярки М. Т. Оценка современного состояния экосистемы Онежского озера по гидробиологическим показателям и устойчивости функционирования водных сообществ. Зоопланктон // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России. Современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Карельский науч. центр Российской академии наук, Ин-т водных проблем Севера; . Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 121–127.
- Сярки М. Т., Куликова Т. П. Зоопланктон Онежского озера: База данных. Рег. номер 2012621150 (9/11/2012). Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) (RU).
- Сярки М. Т., Теканова Е. В. Сезонный цикл первичной продукции в Онежском озере // Известия РАН. Сер. Биологическая. 2008. № 5. С. 621–625.
- Сярки М. Т., Чистяков С. П. О применении метода ортогональных расстояний для моделирования сезонной динамики планктона Онежского озера // Экология. 2013. № 3. С. 234–236. DOI: 10.7868/S036705971302011X
- Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Особенности сезонных процессов в планктоне крупных озер // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Материалы II Международ. конф. 19–24 мая 2019 г. Ч.

2. Казань, 2019. С. 336–341.

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

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Семенов А. В., Анциферова А. Р., Ожигина В. Н., Богдан М. И. Изменения и изменчивость климата европейского севера России и их влияние на водные объекты // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2 (6). С. 80–93.

Филатов Н. Н., Баклагин В. Н., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Изменчивость температуры воды и характеристик ледяного покрова Ладожского и Онежского озера // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2020. С. 53–67.

Фомина Ю. Ю., Сярки М. Т. Определение динамических характеристик зоопланктона Онежского озера // Принципы экологии. 2016. №. 4 (20). С. 49–56. DOI: 10.15393/j1.art.2016.5223

Фомина Ю. Ю. Структурно-функциональная организация и фенология пелагического зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера : Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2022. 22 с.

Adrian R., Wilhelm S., Gerten D. Life-history traits of lake plankton species may govern their phenological response to climate warming // *Global Change Biology*. 2006. Vol. 12. P. 652–661.

Boggs P. T., Rogers J. E. Orthogonal distance regression // *Contemporary Mathematics*. 1990. Vol. 112. P. 183–194.

Jones E. L. Ecological modelling of Lake Erie: sensitivity analysis and simulation of nutrient, phytoplankton and zooplankton dynamics: Diss. master of science Biology and Civil Engineering. Waterloo; Ontario, Canada, 2011. 97 p.

Tselishcheva E. M., Lazareva V. I. Long-Term Dynamics of Zooplankton in the Kama and Votkinsk Reservoirs // *Inland Water*. 2021. Biol 14. P. 415–426. DOI: 10.1134/S1995082921040118

Winder M., Schindler D. E. Climatic effects on the phenology of lake processes // *Global Change Biology*. 2004. Vol. 10. P. 1844–1856.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН.

APPROACHES AND METHODS FOR STUDYING THE ZOOPLANKTON SEASONAL DYNAMICS IN A LARGE LAKE

SYARKI Maria Tagevna *Northern water problems Institute KRC RAN, Petrozavodsk, st.A.Nevskogo, 50, msyarki@yandex.ru*

Keywords:

least squares method
orthogonal distance
minimization method
seasonal dynamics
trajectory
time shifts
intra-annual and inter-
annual variability
phenological phases
zooplankton

Summary: The first response of natural systems to climate change is temporary shifts in seasonal phenomena. The paper considers approaches and methods for studying the zooplankton seasonal dynamics with special attention to temporal variability. The analysis and formalization of the average long-term trajectories of the abundance seasonal dynamics were carried out, and the phases of the seasonal process or phenophases were identified based on a series of data on zooplankton of the Kondopoga Bay of Lake Onega (1988–2021). The determination of the trajectories of the dynamics was carried out using the moving average methods and approximation by a given function. The parameters of the function were determined by the least squares regression (LSR) and orthogonal distance regression (ODR) methods. It is shown that a more accurate method is to use ODR. The scale of their intra-annual and interannual variability was estimated based on a series of models of the average long-term seasonal dynamics of quantities. The scale of possible time shifts was estimated and criteria for the extremity of rebound points were proposed. It was shown that within the vegetation period there are reliably 4 phenophases with characteristic features of the zooplankton structure using the method of discriminant analysis. Their terms differ from calendar seasons. Information obtained by different methods (continuous and discrete approaches) complement each other. Methods for formalizing seasonal plankton dynamics are the basis for assessing the response of plankton to fluctuations in climatic and anthropogenic factors.

Received on: 30 August 2024

Published on: 10 December 2024

References

- Adrian R., Wilhelm S., Gerten D. Life-history traits of lake plankton species may govern their phenological response to climate warming, *Global Change Biology*. 2006. Vol. 12. P. 652–661.
- Alimov A. F. Bogatov V. V. Golubkov S. M. Production hydrobiology. M.: Nauka, 2013. 344 p.
- Andronikova I. N. Structural and functional organization of zooplankton in lake ecosystems. SPb.: Nauka, 1996. 190 p.
- Boggs P. T., Rogers J. E. Orthogonal distance regression, *Contemporary Mathematics*. 1990. Vol. 112. P. 183–194.
- Filatov N. N. Baklagin V. N. Efremova T. V. Pal'shin N. I. Variability of water temperature and ice cover characteristics of Lake Ladoga and Lake Onega, *Diagnoz i prognoz termogidrodinamiki i ekosistem velikih ozer Rossii*, Pod red. N. N. Filatova. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2020. P. 53–67.
- Filatov N. N. Nazarova L. E. Georgiev A. P. Semenov A. V. Anciferova A. R. Ozhigina V. N. Bogdan M. I. Changes and variability of the climate of the European north of Russia and their impact on water bodies, *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2012. No. 2 (6). P. 80–93.
- Fomina Yu. Yu. Syarki M. T. Determination of dynamic zooplankton characteristics of the Lake Onego, *Principy ekologii*. 2016. No. 4 (20). P. 49–56. DOI: 10.15393/j1.art.2016.5223
- Fomina Yu. Yu. Structural and functional organization and phenology of pelagic zooplankton of the Petrozavodsk Bay of Lake Onega: Avtoref. dip. ... kand. biol. nauk. Petrozavodsk, 2022. 22 p.
- Jones E. L. Ecological modelling of Lake Erie: sensitivity analysis and simulation of nutrient, phytoplankton and zooplankton dynamics: Diss. master of science Biology and Civil Engineering. Waterloo; Ontario, Canada, 2011. 97 p.
- Kalinkina N. M. Tekanova E. V. Syarki M. T. The ecosystem of Lake Onega: the response of aquatic communities to anthropogenic factors and climate change, *Vodnoe hozyaystvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*. 2017. No. 1. P. 4–18. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-1-1
- Kulikova T. P. Kustovlyankina N. B. Syarki M. T. Zooplankton as a component of the Lake Onega ecosystem. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 1997. 112 p.

- Lake Onego: Atlas, Otv. red. N. N. Filatov. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2010. 151 p.
- Lazareva V. I. Features of long-term (1956–2005) zooplankton dynamics in the Rybinsk Reservoir, Vodnye resursy. 2010b. T. 37, No. 5. P. 590–604.
- Lazareva V. I. Structure and dynamics of zooplankton in the Rybinsk Reservoir. M.: Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2010a. 183 p.
- Methods of materials sampling and processing in hydrobiological research on freshwater bodies. Zooplankton and its productions, Pod red. G. G. Vinberg, G. M. Lavrent'eva. L.: GosNIORH, 1984. 33 c.
- Mineeva N. M. Lazareva V. I. Poddubnyy S. A. Zakonnova A. V. Kopylov A. I. Kosolapov D. B. Korneva L. G. Sokolova E. A. Pyrina I. L. Mitropol'skaya I. V. Structure and functioning of plankton communities in the Rybinsk reservoir under climate change conditions, Biologiya vnutrennih vod. 2024. No. 1. C. 3–21. DOI: 31857/S032096522 4010018
- Pal'shin N. I. Efremova T. V. Stochastic model of annual cycle of water surface temperature in lakes, Meteorologiya i gidrologiya. 2005. No. 3. P. 85–94.
- Smirnova T. S. Planktonic rotifers and crustaceans. Zooplankton of Onego Lake, Zooplankton Onezhskogo ozera. L., 1972. P. 126–233.
- Syarki M. T. Chistyakov S. P. On Application of the Orthogonal Distance Method to Onego Lake Plankton Seasonal Cycling Modelling, Ekologiya. 2013. No. 3. P. 234–236. DOI: 10.7868/S036705971302011X
- Syarki M. T. Kulikova T. P. Zooplankton of Lake Onega: Database. Reg. nomer 2012621150 (9/11/2012). Pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut vodnyh problem Severa Karel'skogo nauchnogo centra RAN (IVPS KarNC RAN) (RU).
- Syarki M. T. Tekanova E. V. Seasonal cycle of primary production in Onego Lake, Izvestiya RAN. Ser. Biologicheskaya. 2008. No. 5. P. 621–625.
- Syarki M. T. Assessment of the current state of the Onega Lake ecosystem based on hydrobiological indicators and the sustainability of the functioning of aquatic communities. Zooplankton, Krupneyshie ozera-vodohranilishcha severo-zapada evropeyskiy territorii Rossii. Sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskih i antropogennyh vozdeystviyah, Karel'skiy nauch. centr Rossiyskoy akad. nauk, In-t vodnyh problem Severa; . Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2015. P. 121–127.
- Syarki M. T. How long is zooplankton summer in Onego Lake, Principy ekologii. 2013b. No. 4. P. 70–75. DOI: 10.15393/j1.art.2013.2781
- Syarki M. T. The study of seasonal dynamics of plankton trajectories using the double-smoothing method, Principy ekologii. 2013a. No. 1 (5). P. 61–67. DOI: 10.15393/j1.art.2013.2141
- Syarki M. T., Fomina Yu. Yu. Osobennosti sezonnyh processov v planktone krupnyh ozer, Ozera Evrazii: problemy i puti ih resheniya: Materialy II Mezhdunar. konf. 19–24 maya 2019 g. Ch. 2. Kazan', 2019. P. 336–341.
- The largest lake-reservoirs of the north-west european part of Russia: Current state and changes of ecosystems under climate and anthropogenic impact, Karel'skiy nauch. centr Rossiyskoy akad. nauk, In-t vodnyh problem Severa; . Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2015. 375 p.
- Third assessment report on climate change and its consequences in the Russian Federation. SPb.: Naukoemkie tehnologii, 2022. 124 p.
- Tselishcheva E. M., Lazareva V. I. Long-Term Dynamics of Zooplankton in the Kama and Votkinsk Reservoirs, Inland Water. 2021. Biol 14. P. 415–426. DOI: 10.1134/S1995082921040118
- Winder M., Schindler D. E. Climatic effects on the phenology of lake processes, Global Change Biology. 2004. Vol. 10. P. 1844–1856.