



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра водных биоресурсов, аквакультуры и гидрохимии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Бакалаврская работа)

На тему «Динамика численности и биомассы зоопланктона Балтийского
моря и его роль в питании промысловых видов рыб.»

Направление подготовки 35.03.08 Водные биоресурсы и аквакультура,
профиль «Управление водными биоресурсами и аквакультура»

Исполнитель _____ Кузьмина Софья Андреевна

(подпись)

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____ Позднякова А.И., к.п.н.

(подпись)

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____ Королькова С.В., к.т.н.

(подпись)

(фамилия, имя, отчество)

« ____ » _____ 2024 г.

Санкт-Петербург

АННОТАЦИЯ

Настоящая работа посвящена исследованию динамики численности и биомассы зоопланктона Балтийского моря и его роли в питании промысловых видов рыб. В работе рассматриваются как теоретические аспекты изучения зоопланктона, включая историю исследований и современное состояние сообществ, так и практические подходы к мониторингу и управлению биоресурсами. Особое внимание уделено функциональной значимости зоопланктона как ключевого элемента трофических сетей морской экосистемы, обеспечивающего передачу энергии от первичных продуцентов к промысловым рыбам, таким как сельдь, шпрот и молодь трески.

В рамках исследования проанализированы данные по видовому составу зоопланктона за период 2018–2022 гг., приведены таблицы регистрации основных таксонов, включая коловраток, веслоногих рачков, бранхиопод, мизид и других групп. Описаны изменения в структуре сообществ под влиянием климатических факторов, антропогенного воздействия и изменений гидробиологического режима моря.

Представлены рекомендации по укреплению системы долгосрочного мониторинга, включая расширение сети наблюдательных станций, внедрение новых технологий сбора и анализа данных (автономные ловушки, дистанционное зондирование, ДНК-баркодирование), а также учет вертикального распределения зоопланктона при оценке доступности кормовой базы для рыб. Предложены меры по интеграции полученных данных в практику управления рыбными ресурсами на основе экосистемного подхода.

Определены перспективные направления дальнейших исследований: развитие методов автоматизации обработки данных, изучение реакции зоопланктона на турбулентность и другие физические параметры среды, моделирование последствий климатических изменений для трофических связей, а также совершенствование подходов к международному сотрудничеству и подготовке научных кадров.

Работа выполнена с использованием материалов экспедиционных исследований и опирается на обширную библиографическую базу, включающую как классические труды по планктологии, так и современные научные публикации. Результаты исследования могут быть использованы для прогнозирования состояния рыбных запасов, разработки мер по устойчивому рыболовству и сохранению биоразнообразия Балтийского моря.

СОДЕРЖАНИЕ

<u>ВВЕДЕНИЕ</u>	4
<u>ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ЗООПЛАНКТОНА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ И ЕГО РОЛИ В ЭКОСИСТЕМЕ</u>	7
<u>1.1. История изучения зоопланктона Балтийского моря</u>	7
<u>1.2. Современное состояние зоопланктона и его роль в питании рыб</u>	11
<u>ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЗООПЛАНКТОНА</u>	24
<u>2.1. Методология сбора и обработки данных</u>	24
<u>2.2. Анализ динамики численности и биомассы зоопланктона</u>	29
<u>ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ</u>	42
<u>3.1. Рекомендации по мониторингу и управлению биоресурсами</u>	42
<u>3.2. Перспективы дальнейших исследований</u>	57
<u>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</u>	65
<u>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</u>	67

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования обусловлена ключевой ролью зоопланктона в экосистеме Балтийского моря, поскольку он служит основным звеном в трофической цепи, обеспечивая кормовую базу для многих промысловых видов рыб. Изменения численности и биомассы зоопланктона напрямую влияют на состояние рыбных ресурсов, что имеет важное значение для рыболовной отрасли и продовольственной безопасности. В последние десятилетия Балтийское море подвергается значительным антропогенным нагрузкам, включая эвтрофикацию, загрязнение и климатические изменения, что может приводить к трансформации зоопланктонных сообществ. Изучение динамики зоопланктона позволяет оценить устойчивость морской экосистемы и спрогнозировать возможные изменения в популяциях промысловых рыб.

Существующие данные о многолетних колебаниях зоопланктона остаются фрагментарными, что затрудняет выявление долгосрочных тенденций и разработку эффективных мер по управлению биоресурсами. Особую значимость приобретает исследование влияния климатических факторов, таких как потепление вод и снижение солёности, на структуру и продуктивность зоопланктона. Недостаточная изученность роли отдельных видов зоопланктона в питании рыб ограничивает возможности рационального рыболовства и экосистемного подхода к управлению морскими ресурсами.

Современные методы мониторинга, включая дистанционные технологии, открывают новые перспективы для более точной оценки состояния зоопланктонных сообществ. Полученные в ходе исследования данные могут быть использованы для совершенствования природоохранных мер и адаптации рыбопромысловой деятельности к изменяющимся условиям. Таким образом, данная работа вносит вклад в решение актуальных задач морской экологии и рыбного хозяйства, обеспечивая научную основу для устойчивого использования ресурсов Балтийского моря.

Цель исследования – изучить динамику численности и биомассы зоопланктона Балтийского моря и оценить его роль в питании промысловых видов рыб.

Задачи исследования:

1. Проанализировать историю изучения зоопланктона Балтийского моря, выделив ключевые этапы, методы и вклад ведущих исследований в развитие гидробиологии региона.
2. Охарактеризовать современное состояние зоопланктона, включая его видовой состав, пространственное распределение и влияние абиотических факторов на динамику сообществ.
3. Изучить роль зоопланктона в питании промысловых рыб, выявив ключевые трофические связи и зависимость рыбных популяций от кормовой базы.
4. Систематизировать методы сбора и обработки данных по зоопланктону, оценив их эффективность и применимость для долгосрочного мониторинга.
5. Провести анализ динамики численности и биомассы зоопланктона, установив основные тенденции и факторы, влияющие на его межгодовые колебания.
6. Разработать рекомендации по управлению биоресурсами и предложить направления дальнейших исследований для прогнозирования состояния экосистемы Балтийского моря.

Объект исследования – зоопланктонные сообщества Балтийского моря и их взаимосвязь с популяциями промысловых рыб.

Предмет исследования – закономерности динамики численности, биомассы и видового состава зоопланктона Балтийского моря, а также его трофические связи с промысловыми видами рыб.

Используемые методики – анализ специализированной литературы, статистическая обработка данных.

Практическая значимость – полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования состояния рыбных запасов, разработки мер по устойчивому рыболовству и охране морских экосистем.

Структура работы: введение, три главы, заключение и список литературы.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ЗООПЛАНКТОНА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ И ЕГО РОЛИ В ЭКОСИСТЕМЕ

1.1. История изучения зоопланктона Балтийского моря

История изучения зоопланктона Балтийского моря охватывает несколько столетий и включает в себя этапы постепенного накопления знаний о составе, структуре и динамике сообществ микроскопических животных, обитающих в толще воды этого уникального полуизолированного бассейна с опреснёнными водами. Как один из ключевых компонентов морской экосистемы, зоопланктон играет важную роль в трофических сетях, обеспечивая связь между первичными продуцентами (фитопланктоном) и более высокими уровнями пищевой цепи, включая рыбу и других хищников. Его исследование имеет фундаментальное значение для понимания функционирования экосистемы Балтийского моря, особенно в условиях антропогенных нагрузок и климатических изменений.

Первые упоминания о планктонных организмах в Балтийском море относятся к концу XVIII — началу XIX века, когда европейские учёные начали интересоваться фауной прибрежных вод. Однако систематические исследования зоопланктона начались значительно позже, в конце XIX — начале XX века, в рамках широкомасштабных экспедиций, проводимых такими странами как Швеция, Германия, Россия и Дания. Одной из ранних работ можно считать исследования шведского океанолога Мартена Свенса, проводившиеся на борту научно-исследовательского судна «Albatross» в 1900–1901 годах. Эти работы стали основой для последующих исследований состава и распределения планктонных организмов в разных районах Балтийского моря.

В первой половине XX века изучение зоопланктона стало более регулярным и институционализированным. В этот период активное участие в исследованиях принимали такие учреждения, как Институт морских исследований Швеции (SMHI), Институт морской биологии в Киле (Германия), а также российский Институт океанологии им. П.П. Ширшова и его

предшественники. Основное внимание уделялось таксономии и биологии доминирующих видов, таких как веслоногие рачки *Pseudocalanus acuspinatus* , *Temora longicornis* , *Acartia spp.* , а также личиночные стадии рыб и других беспозвоночных. Учёные стремились выявить пространственно-временные закономерности распределения зоопланктона, а также факторы, влияющие на его численность и биомассу.

С середины XX века изучение зоопланктона Балтийского моря получило новый импульс благодаря развитию методов количественной оценки и долгосрочного мониторинга. Особое значение приобрели программы наблюдений, проводимые в рамках международных проектов, таких как HELCOM (Хельсинкская комиссия), созданная в 1974 году для координации усилий стран Балтийского региона по защите морской среды. Регулярные сборы проб зоопланктона стали неотъемлемой частью этих программ, что позволило отслеживать изменения в сообществах на протяжении десятилетий. Такие данные оказались особенно ценны для анализа последствий эвтрофикации, загрязнения, изменения климата и проникновения инвазивных видов.

Особый интерес представляет изучение сезонной динамики зоопланктона. В условиях выраженной сезонности климата и гидрологического режима Балтийского моря зоопланктон демонстрирует чётко выраженные циклы размножения, развития и вертикальной миграции. Например, массовое развитие веслоногих рачков происходит весной и летом, совпадая с пиком продуктивности фитопланктона. Осенью и зимой доминируют холодноводные виды, способные переносить пониженные температуры и меньшую солёность. Исследования показали, что сезонные циклы зоопланктона тесно связаны с гидрометеорологическими условиями, включая температуру, солёность, уровень света и содержание питательных веществ в воде.

Пространственное распределение зоопланктона в Балтийском море также подвержено значительным вариациям, обусловленным прежде всего градиентом солёности от запада к востоку. Западные районы, такие как Бельт и Зунд, характеризуются более высокой солёностью и богатым видовым составом, тогда

как восточные части моря, например, Финский залив и Ботнический залив, отличаются опреснёнными водами и ограниченным числом видов. Некоторые виды, например, *Limnocalanus macrurus* и *Cyclops strenuus*, являются эндемиками или реликтами пресноводного происхождения, что делает их особенно чувствительными к изменениям окружающей среды. Это обстоятельство стимулировало проведение сравнительных исследований, направленных на выявление адаптационных механизмов и границ распространения отдельных таксонов.

Важной вехой в истории изучения зоопланктона стало внедрение новых технологий, включая автоматизированные системы сбора проб, электронную микроскопию, молекулярно-генетические методы идентификации видов, а также моделирование динамики популяций и сообществ. Эти подходы позволили глубже понять структуру зоопланктонных сообществ, их взаимодействие с другими компонентами экосистемы и реакцию на внешние воздействия. Например, использование ДНК-баркодирования позволило выявить скрытые виды и уточнить систематическое положение некоторых таксонов, ранее объединяемых в сложные группы.

Антропогенные факторы оказали существенное влияние на состояние зоопланктонных сообществ Балтийского моря. Эвтрофикация, вызванная увеличением стока биогенных элементов с суши, привела к усилению цветения фитопланктона, что, в свою очередь, повлияло на доступ пищи для зоопланктона. Однако в ряде случаев это привело к снижению качества пищи из-за преобладания крупных диатомовых водорослей и цианобактерий, которые труднее перевариваются многими видами зоопланктона. Кроме того, увеличение частоты гипоксических событий в придонных слоях воды привело к сокращению доступных мест обитания для многих видов, особенно тех, которые зависят от хорошо аэрированных вод.

Загрязнение моря токсичными веществами, включая тяжёлые металлы, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и полихлорированные бифенилы (ПХБ), также оказало негативное влияние на зоопланктон.

Исследования показали, что даже низкие концентрации этих веществ могут нарушать репродуктивные функции, снижать выживаемость личинок и изменять поведение организмов. В связи с этим вопросы токсикологии и биоаккумуляции в зоопланктоне становятся всё более актуальными, особенно в свете необходимости оценки состояния всей экосистемы.

Ещё одной важной проблемой является изменение климата. Повышение средней температуры воды, изменение режима осадков и усиление стратификации водной толщи влияют на гидрологический режим моря и, соответственно, на условия обитания зоопланктона. Некоторые виды, адаптированные к более низким температурам, теряют конкурентные преимущества, в то время как другие, теплолюбивые виды, начинают занимать новые территории. Подобные сдвиги в сообществах могут иметь далеко идущие последствия для всей экосистемы, включая рыбные ресурсы, зависящие от зоопланктона как источника пищи.

Международное сотрудничество сыграло ключевую роль в организации систематических исследований зоопланктона Балтийского моря. На протяжении многих лет страны региона объединяли усилия для стандартизации методов сбора и анализа данных, что обеспечивает сопоставимость результатов и возможность проведения долгосрочных анализов. Программы мониторинга, такие как ICES ZMP (International Council for the Exploration of the Sea Zooplankton Monitoring Programme), способствовали созданию баз данных, которые используются для научных исследований и разработки политики в области охраны окружающей среды.

Таким образом, история изучения зоопланктона Балтийского моря отражает эволюцию подходов к исследованию морских экосистем: от случайных находок и описаний отдельных видов до комплексного анализа сообществ, их функциональной роли и реакции на антропогенные и климатические воздействия. Значение зоопланктона как индикатора состояния экосистемы несомненно, и дальнейшие исследования будут играть ключевую роль в

обеспечении устойчивого управления морскими ресурсами и сохранении биоразнообразия Балтийского моря.

1.2. Современное состояние зоопланктона и его роль в питании рыб

Зоопланктон – водные животные, которые не могут противостоять течениям и пассивно переносятся вместе с водными массами.

В составе зоопланктона встречаются представители большинства типов животного царства. В большинстве водоёмов самая многочисленная группа зоопланктона - мелкие ракообразные. В состав зоопланктона входят также личинки многих животных, пелагическая икра рыб. Организмы зоопланктона питаются фитопланктоном, бактериопланктоном, детритом или более мелкими представителями зоопланктона. Зоопланктон - основа пищевых цепочек в биоценозах пресных водоёмов. Это звено пищевых цепей, связывающее фитопланктон, который образует первичную продукцию, с более крупными нектонными и бентосными животными.

Одними из самых распространённых организмов зоопланктона пресных вод, являются дафнии, босмины, диаптомусы и циклопы.

Исследования роли консументов (организмы не производящие питательные вещества самостоятельно) в формировании структуры и функционировании экосистем в пресных водоемах интенсивно ведутся в течении нескольких десятилетий. Теоретической основой этого направления служат представления о «контроле с верху» трофической пирамиды (рис.1), согласно которым численность и биомасса организмов определенного трофического уровня определяется не только количеством доступных ресурсов, но также прессом организмов последующего трофического уровня.

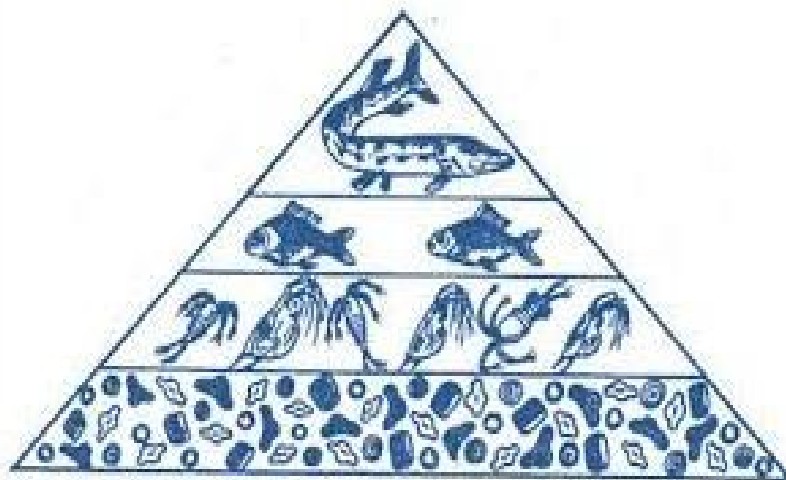


Рисунок 1 – Трофическая пирамида

Доступность организмов планктона для рыб определяется размерами, подвижностью пищевых объектов, их распределением, плотностью, возрастной изменчивостью самих потребителей, избирательностью питания последних, а также условиями внешней среды. В обширной литературе по питанию рыб нередко приводятся противоречивые заключения по данному вопросу. Если одни исследователи у некоторых видов рыб находят довольно ограниченный спектр питания, то другие у тех же видов отмечают высокую пищевую пластичность. Как среди морских, так и пресноводных рыб имеются многие типичные планктофаги, которые всегда на всех стадиях жизни питаются планктоном, а среди рыб донных, питающихся бентосом, многие виды в стадии личинки или малька потребляют планктон.

Количество организмов планктона, поедаемых крупными морскими планктофагами, громадно. Кишечник одной крупной сельди может содержать свыше 60 000 мелких рачков. У рыб имеется избирательность по отношению к пище, которая зависит прежде всего от степени доступности пищевого объекта, а затем от его численности в водоеме. Степень же доступности определяется строением рта, глотки и жаберного аппарата, которые у разных видов рыб и разных возрастных стадий их неодинаковы.

Анализируя достаточность пищи для различных трофических уровней в пищевой цепи моря, Парсонс и Ле Брассер установили два основных типа пищевой цепи на нижних трофических уровнях в океанах: 1) длинная цепь: наннопланктон → микрозоопланктон → макрозоопланктон рыба; 2) короткая цепь: микропланктон → макрозоопланктон → рыба. Первый тип характерен для субарктических океанических вод Тихого океана, второй – для прибрежных вод, районов подъема и антарктических вод. Таким образом, кроме различий в общем уровне первичной продукции в прибрежных и океанических водах или между двумя океаническими районами, эффективность передачи энергии до более крупных организмов должна быть ниже в океанической среде, где преобладает фотосинтез наннопланктона, нежели в среде, где преобладает микропланктон. В океанической среде значительную роль в передаче энергии от наннопланктона к более крупному зоопланктону и к рыбе иногда могут играть радиолярии.

Кроме непосредственной связи рыб с планктоном как источником их питания, необходимо также учитывать косвенные связи рыб с планктоном.

В евтрофных водоемах за счет отмирающего и опускающегося на дно планктона образуются донные илы – сапропели, богатые органическими веществами. Этими илами питаются различные донные животные, которые в свою очередь служат пищей донных рыб.

Огромную роль зоопланктон играет также в питании китов, особенно настоящих, в том числе и японского кита *Eubalaena glacialis sieboldii*, а также усатых *Mystacoceti*. Основным пищевым объектом для гладких китов Антарктики и прилежащих к ней вод служит *Euphausia superba* или криль. Главный корм а 6 гладких китов в Северной Атлантике –

Calanus finmarchicus. Основные пищевые компоненты финвала – *Balaenoptera musculus*, в дальневосточных водах – *Calanoida* и *Euphausiidae*.

Суточное потребление пищи у крупных китов может достигать 3 – 4 тонн. В северной части Тихого океана гладкие киты специализировались на питании только каланусом. У гладких китов вообще и у японского, в частности, очень ярко выражена стенофагия и избирательная способность. Японские киты

предпочитают каланид всем прочим животным, образующим скопления в дальне-восточных морях, редко у них в желудках находили амфиподу *Parathemisto pacifica* и *Euphausia pacifica*. Синий кит *Balaenoptera physalus* типичный планктофаг, предпочитающий питаться евфаузидами.

Содержимое желудка большого беззубого кита может весить несколько тонн, а один килограмм его пищи содержит много миллионов поедаемых им рачков. Поэтому совершенно понятно, что в тех районах Арктики и Антарктики, где летом имеется большое скопление ракообразных, будут держаться и кормящиеся ими киты. Такие скопления рачков чаще наблюдаются в приполярных водах, в местах усиленных подъемов воды, хотя встречаются и в водах средних широт и в тропиках. Так, например, обширные пространства открытой части Аравийского моря покрыты скоплениями капшака, видимыми даже с самолета.

По произведенным подсчетам усатые киты могут питаться зоопланктоном, если биомасса последнего больше 1500–2000 мг/м³. Летом финвал и горбач, или головач, *Megaptera nodosa* средней промысловой величины, вероятно, съедает 1 – 1.5 тонн планктона в сутки. Для получения такого количества планктона они должны питаться в слое максимальной концентрации планктона и находить этот слой главным образом с помощью эхолокации.

Основная масса зоопланктона представлена видами с фильтрационным типом питания. На их долю в пресных водоемах приходится до 80% общей массы зоопланктона (Петипа, 1981; Иванова, 1985).

Именно они играют ведущую роль в трансформации вещества и передаче энергии по трофической цепи от фитопланктона к рыбам. Поэтому изучение участия ракообразных в метаболизме планктона служит важнейшим средством для выяснения всей системы трофических связей в водоеме.

Изучая зоопланктон безрыбных и зарыбляемых прудов, в первых доминируют крупные кладоцеры *Daphnia*, в то время как в зарыбляемых прудах зоопланктон представлен мелкими ракообразными. В отсутствие рыб-

планктофагов крупный зоопланктон монополизирует имеющиеся ресурсы, а мелкие виды элиминируются из состава сообщества (Brooks, Dodson, 1965)

Крупный зоопланктон очень чувствителен к прессу позвоночных хищников. Следуя из этого, крупные виды зоопланктона вырабатывают различные приспособления для уменьшения эффективности их пресса, например, совершают вертикальные миграции, при которых они в дневное время мигрируют в нижние слои воды, куда свет не достигает и где они становятся невидимыми для рыб, а в ночное время поднимаются в верхние трофогенные слои для питания. Это помогает им избегать планктофагов и поддерживать высокую плотность популяции даже при высокой численности рыб в водоеме. Однако вертикальные перемещения требуют затрат энергии, а при погружении за пределы эвфотной зоны зоопланктеры оказываются в слоях, бедных пищей, что снижает скорость воспроизводства их популяции (Morin, 1987; Gliwicz, 2003)

Таким образом, рыбы-планктофаги могут быть важным регулятором структуры и интенсивности потоков энергии в пелагиали водоемов, включая изменения в обмене веществом и энергии между поверхностными и природными слоями водоема.

Несомненно, в природе пищевые связи разграничены не так четко. Чаще всего в водоеме одновременно присутствует и тот, и другой варианты пищевой цепи. Говоря о пастбищной или детритной пищевой цепи, здесь имеется в виду преобладание одной из них над другой.

Показано, что в низкопродуктивных водоемах основную роль играют пастбищные пищевые цепи, а в высокопродуктивных, большое значение приобретают детритно-бактериальные. Следует также иметь в виду, что первичная продукция, использованная в пищу фильтраторами, частично возвращается в среду в виде продуктов обмена (жидких и твердых выделений), которые в дальнейшем разлагаются бактериями до биогенных элементов. У фитофагов иногда до 90% общего количества потребленной пищи не усваивается и выделяется в виде экскрементов. Мертвое органическое вещество (детрит) и фекальные пеллеты используются в пищу как микроорганизмами, так и самим

же зоопланктоном. Копрофагия в водных экосистемах играет важную роль в пищевых цепях (Секи, 1986).

Минимальный размер частиц, потребляемых фильтраторами, определяется густотой фильтрующего аппарата. В зависимости от способности отфильтровать одиночные бактериальные клетки, ракообразных-фильтраторов условно разделяют на «тонких» и «грубых» фильтраторов. «Тонкие» фильтраторы являются активными потребителями одиночных бактериальных клеток и могут довольно долго существовать на этом виде корма, тогда как минимальный размер частиц, потребляемых «грубыми» фильтраторами, часто выше, чем размер бактерий. Они потребляют в лучшем случае агрегированные бактериальные клетки.

К «тонким» фильтраторам относят основную массу *Cladocera*, к «грубым» - многие *Copepoda* с фильтрационным типом питания (Lampert, 1974).

Отмечено, что во время массового развития крупных колониальных форм водорослей, несмотря на одновременное увеличение численности кормовых водорослей, снижались плодовитость и численность многих видов ракообразных.

Крупные колонии водорослей могут быть токсичными или неполноценными в пищевом отношении для планктонных ракообразных, или засорять их фильтрационный аппарат. Это снижает потребление кормовых водорослей и уменьшает рацион животных. Снижение потребления пищи дафниями является одной из причин, из-за чего происходит снижение плодовитости рачков в водоеме при увеличении количества цианобактерий (Gliwicz, 2003).

Однако на увеличение концентрации крупных цианобактерий разные виды кладоцер реагируют неодинаково.

Как уже отмечалось выше, потребление колониальных форм водорослей в естественных условиях зависит от размера колоний. Последние определяются состоянием популяции тех или иных видов водорослей, динамичностью водных масс и многими другими факторами. Размеры колоний водорослей в водоемах

колеблются в широких пределах, от «съедобных» до «несъедобных». В зависимости от доминирования тех или иных размерных групп они с разной интенсивностью будут потребляться фильтраторами.

Таким образом, интенсивность пресса зоопланктона на фитопланктон является важным фактором, определяющим продуктивность и состав сообщества планктонных продуцентов. В ходе сезонной сукцессии наблюдается закономерная смена весеннего планктона с преобладанием мелких продуцентов (мелких быстро растущих видов водорослей) и консументов (инфузорий и коловраток) с высокой скоростью оборота биомассы, на летний планктон с преобладанием крупных организмов (крупных и колониальных видов водорослей и рачкового зоопланктона). Трофодинамическим следствием этой сукцессии служит переход от весеннего сообщества с одними-двумя трофическими уровнями к летнему сообществу с двумя-тремя уровнями, а также от высокой весенней продуктивности к более низкой летней.

Современное состояние зоопланктона Балтийского моря является важным индикатором экосистемного здоровья и функциональной устойчивости водных сообществ. Как ключевой компонент трофических сетей, зоопланктон обеспечивает передачу энергии от первичных продуцентов — фитопланктона — к более высоким трофическим уровням, включая планктоноядную рыбу, которая использует его как основной источник пищи на ранних стадиях жизненного цикла. В условиях продолжающихся антропогенных воздействий, изменений климатических параметров и трансформации гидробиологического режима Балтийского моря, изучение современного состояния зоопланктона и его роли в питании рыб приобретает особую актуальность для оценки состояния экосистемы и прогнозирования её дальнейшего развития.

Зоопланктон Балтийского моря представлен широким спектром таксономических групп, включающих веслоногих рачков (Copepoda), ветвистоусых ракообразных (Cladocera), личиночные стадии моллюсков и иглокожих, сальп и других свободноплавающих организмов. Наибольшее

значение в количественном и биомассовом отношении принадлежит веслоногим рачкам, особенно таким видам, как *Pseudocalanus acuspinatus* , *Temora longicornis* , *Acartia spp.* , а также эндемичному пресноводному виду *Limnocalanus macrurus* . Эти организмы доминируют в летние месяцы, когда температура воды и продуктивность фитопланктона достигают максимума. Их численность и биомасса подвержены значительным сезонным и межгодовым колебаниям, обусловленным изменениями в гидрологическом режиме, доступностью пищи и степенью воздействия хищников.

В последние десятилетия отмечено существенное изменение структуры зоопланктонных сообществ, связанное с комплексом факторов, включая повышение температуры воды, усиление стратификации водной толщи, изменение режима стока рек и увеличение частоты гипоксических событий. Некоторые исследования указывают на снижение относительного вклада холодноводных видов, таких как *Pseudocalanus acuspinatus* , и одновременный рост доли теплолюбивых таксонов, например, *Acartia tonsa* . Это свидетельствует о происходящих климатически обусловленных сдвигах в составе зоопланктона, которые могут иметь серьёзные последствия для всей пищевой сети моря. Кроме того, наблюдается увеличение численности микрозоопланктона — простейших и мелких ракообразных, что может быть связано с изменением качества пищи и усилением конкуренции между различными группами потребителей.

Роль зоопланктона в питании рыб чрезвычайно разнообразна и зависит от вида рыбы, её возраста, сезона и географического положения. Для большинства промысловых видов рыб, таких как сельдь (*Clupea harengus membras*), шпрот (*Sprattus sprattus balticus*), треска (*Gadus morhua callarias*), окунь (*Perca fluviatilis*) и судак (*Sander lucioperca*), зоопланктон служит основным пищевым объектом на ранних этапах жизни — от стадии личинки до молоди. Личинки рыб, обладая ограниченной способностью к выборочной добыче пищи, зависят от наличия мелких форм зоопланктона, в первую очередь науплиусов веслоногих рачков, коловраток и кладоцер. С возрастом рыбы переходят к более крупной пище, однако даже взрослые особи некоторых видов продолжают использовать

зоопланктон как часть своего рациона, особенно в периоды, когда другие источники пищи ограничены.

Особое значение имеет роль зоопланктона в питании молоди сельди и шпрота, которые в Балтийском море являются ключевыми элементами открытой экосистемы и представляют собой важный объект коммерческого рыболовства. Исследования желудочного содержимого этих видов показали, что их рацион на ранних стадиях состоит преимущественно из веслоногих рачков и их копеподитных стадий. Плотность и качество зоопланктона оказывают прямое влияние на выживаемость и рост молоди, что, в свою очередь, определяет воспроизводство популяций и общую продуктивность рыбных запасов. Таким образом, колебания в численности зоопланктона могут быть одним из важнейших факторов, ограничивающих успех размножения и роста молоди рыб.

Кроме того, зоопланктон выполняет функцию «экосистемного посредника», связывая процессы первичной продукции с вторичной продукцией. Эта роль становится особенно заметной в условиях эвтрофикации, когда повышенный уровень биогенных веществ стимулирует развитие фитопланктона, но не всегда приводит к соответствующему увеличению биомассы зоопланктона. Некоторые виды фитопланктона, такие как цианобактерии и крупные диатомовые водоросли, плохо перевариваются многими представителями зоопланктона, что снижает эффективность переноса энергии по трофической цепи. В результате, несмотря на высокую первичную продукцию, доступная пища для зоопланктона может быть недостаточной или низкокачественной, что, в свою очередь, ограничивает развитие рыбных популяций.

Антропогенные воздействия, такие как загрязнение, изъятие биомассы в результате рыболовства и изменения климатического характера, также влияют на состояние зоопланктонных сообществ и их доступность для рыб. Загрязнение токсичными веществами, включая тяжёлые металлы, полихлорированные бифенилы (ПХБ) и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), может нарушать репродуктивные функции зоопланктона, снижать выживаемость личинок и влиять на поведение организмов. Даже низкие

концентрации загрязняющих веществ способны вызывать сублетальные эффекты, которые со временем могут привести к снижению общей продуктивности зоопланктона. В свою очередь, это может отрицательно сказаться на питании и развитии рыбной молоди, особенно чувствительной к колебаниям доступности пищи.

Изменения климатического характера, в частности повышение температуры воды и изменение режима осадков, также оказывают влияние на зоопланктон. Увеличение температуры способствует ускорению метаболизма и скорости развития многих видов, однако может нарушить синхронизацию между пиками массового размножения зоопланктона и периодом наибольшей потребности в пище со стороны рыбной молоди. Такие временные дисбалансы, известные как «phenological mismatch», могут привести к снижению выживаемости личинок рыб и, соответственно, к сокращению запасов промысловых видов. Кроме того, потепление способствует проникновению новых видов зоопланктона из соседних бассейнов, что может изменить структуру сообществ и создать дополнительную конкуренцию для автохтонных видов.

Международные программы мониторинга, такие как HELCOM и ICES ZMP, обеспечивают регулярное наблюдение за состоянием зоопланктона и его ролью в экосистеме Балтийского моря. Эти данные позволяют отслеживать долгосрочные тренды, выявлять причинно-следственные связи между изменениями в зоопланктонных сообществах и внешними факторами, а также моделировать возможные сценарии развития экосистемы под действием различных стрессоров. Современные подходы, включая использование автоматизированных систем сбора проб, молекулярно-генетическую идентификацию видов и моделирование динамики популяций, значительно расширяют возможности анализа и понимания сложных взаимодействий в экосистеме.

Также важно отметить, что зоопланктон является объектом исследований в области биогеохимических циклов, поскольку через свои процессы питания,

экскреции и вертикальных миграций он участвует в транспортировке органического вещества и регуляции углеродного цикла в морской среде. Его роль в формировании "биологического насоса" и связывании углерода делает его важным элементом в глобальных климатических моделях. Изменения в структуре и динамике зоопланктонных сообществ могут, таким образом, влиять не только на региональную экосистему, но и на глобальные процессы, связанные с циркуляцией углерода и питательных веществ.

В заключение следует подчеркнуть, что современное состояние зоопланктона Балтийского моря находится под влиянием множества факторов, включая климатические изменения, антропогенное воздействие и внутрисистемные взаимодействия. Его роль в питании рыб остаётся одной из ключевых функций, определяющих устойчивость и продуктивность морской экосистемы. Сохранение здоровых и устойчивых популяций зоопланктона требует комплексного подхода к управлению морскими ресурсами, учитывающего как местные, так и глобальные воздействия. Продолжающиеся исследования и мониторинг позволят лучше понять динамику зоопланктонных сообществ и их место в сложной системе взаимоотношений, характерных для Балтийского моря, что, в свою очередь, обеспечит научную основу для разработки мер по сохранению биоразнообразия и устойчивому использованию природных ресурсов.

Выводы по главе. Изучение зоопланктона Балтийского моря имеет долгую и богатую историю, начиная с первых упоминаний о планктонных организмах в прибрежных водах ещё в конце XVIII — начале XIX века. Однако систематические исследования этого компонента морской экосистемы начались значительно позже, в конце XIX — начале XX века, в рамках широкомасштабных экспедиций, проводимых такими странами как Швеция, Германия, Россия и Дания. Одним из важных этапов стало исследование шведского океанолога Мартена Свенса на борту судна «Albatross» в 1900–1901 годах, которое положило начало более строгому научному подходу к изучению зоопланктона. В первой половине XX века изучение зоопланктона стало более

регулярным и институционализированным, что связано с развитием методов сбора проб, идентификации видов и анализа их распределения по акватории.

Регулярные сборы проб зоопланктона стали неотъемлемой частью этих программ, что позволило отслеживать изменения в сообществах на протяжении десятилетий. Такие данные оказались особенно ценны для анализа последствий эвтрофикации, загрязнения, изменения климата и проникновения инвазивных видов. Особый интерес представляет изучение сезонной динамики зоопланктона. В условиях выраженной сезонности климата и гидрологического режима Балтийского моря зоопланктон демонстрирует чётко выраженные циклы размножения, развития и вертикальной миграции. Например, массовое развитие веслоногих рачков происходит весной и летом, совпадая с пиком продуктивности фитопланктона. Осенью и зимой доминируют холодноводные виды, способные переносить пониженные температуры и меньшую солёность. Исследования показали, что сезонные циклы зоопланктона тесно связаны с гидрометеорологическими условиями, включая температуру, солёность, уровень света и содержание питательных веществ в воде.

Важной вехой в истории изучения зоопланктона стало внедрение новых технологий, включая автоматизированные системы сбора проб, электронную микроскопию, молекулярно-генетические методы идентификации видов, а также моделирование динамики популяций и сообществ. Эти подходы позволили глубже понять структуру зоопланктонных сообществ, их взаимодействие с другими компонентами экосистемы и реакцию на внешние воздействия. Например, использование ДНК-баркодирования позволило выявить скрытые виды и уточнить систематическое положение некоторых таксонов, ранее объединяемых в сложные группы. Антропогенные факторы оказали существенное влияние на состояние зоопланктонных сообществ Балтийского моря. Эвтрофикация, вызванная увеличением стока биогенных элементов с суши, привела к усилению цветения фитопланктона, что, в свою очередь, повлияло на доступ пищи для зоопланктона. Однако в ряде случаев это привело к снижению качества пищи из-за преобладания крупных диатомовых водорослей

и цианобактерий, которые труднее перевариваются многими видами зоопланктона.

Международное сотрудничество сыграло ключевую роль в организации систематических исследований зоопланктона Балтийского моря. На протяжении многих лет страны региона объединяли усилия для стандартизации методов сбора и анализа данных, что обеспечивает сопоставимость результатов и возможность проведения долгосрочных анализов. Программы мониторинга, такие как ICES ZMP (International Council for the Exploration of the Sea Zooplankton Monitoring Programme), способствовали созданию баз данных, которые используются для научных исследований и разработки политики в области охраны окружающей среды. Таким образом, история изучения зоопланктона Балтийского моря отражает эволюцию подходов к исследованию морских экосистем: от случайных находок и описаний отдельных видов до комплексного анализа сообществ, их функциональной роли и реакции на антропогенные и климатические воздействия.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЗООПЛАНКТОНА

2.1. Методология сбора и обработки данных

Экосистема Балтийского моря испытывает значительные колебания под воздействием природных и антропогенных факторов. Внутриконтинентальное положение моря, ограниченный водообмен с Атлантическим океаном и обширная водосборная площадь формируют уникальные гидрологические условия. Пониженная соленость воды и высокая антропогенная нагрузка, включая регулируемое рыболовство, существенно влияют на состав, структуру и пространственное распределение биологических сообществ.

Зоопланктон Балтийского моря демонстрирует выраженную пространственную изменчивость, обусловленную сезонными и региональными вариациями термохалинных условий. Наличие устойчивого пикноклина препятствует вертикальному перемешиванию водных масс, что усиливает стратификацию абиотических факторов. Это создает специфические условия обитания для различных видов и групп зоопланктона в разных горизонтах водной толщи.

Горизонтальное и вертикальное распределение зоопланктона варьирует в зависимости от района моря и времени года. Помимо гидрологических условий, регулируемых климатическими факторами и балансом пресных и морских вод, на межгодовую динамику зоопланктона влияют трофические взаимодействия. Структура фитопланктонных сообществ, пресс личинок рыб и активность рыб-планктофагов играют ключевую роль в формировании зоопланктонного распределения.

Скопления зоопланктона в определенных горизонтах или районах моря могут оказывать существенное влияние на ихтиоценоз, особенно на личиночные стадии рыб. В Балтийском море промысловое значение имеют треска *Gadus morhua*, балтийская сельдь *Clupea harengus membras*, шпрот *Sprattus sprattus*,

кумжа *Salmo trutta*, атлантический лосось *Salmo salar*, речная камбала *Platichthys flesus* и камбала тюрбо *Scophthalmus maximus*. Мальки этих видов питаются зоопланктоном, а салака и шпрот остаются планктофагами на протяжении всего жизненного цикла.

В связи с этим актуальным является построение карт пространственного распределения зоопланктона с точной географической привязкой для различных сезонов и гидрологических слоев. Имеющиеся данные о распределении зоопланктона Балтийского моря позволяют частично оценить его структуру, однако требуются более детальные исследования с учетом вертикальной стратификации. Анализ термохалинных условий в разных слоях воды необходим для понимания факторов, определяющих состав и распределение зоопланктона.

Полученные карты распределения могут быть использованы для оценки кормовой базы молоди рыб, обитающей в поверхностных или глубинных водах. Это особенно важно для прогнозирования состояния промысловых популяций и разработки мер по устойчивому управлению биоресурсами Балтийского моря.

В основу исследования легли данные по зоопланктону, собранные в ходе экспедиционных работ Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН на научно-исследовательском судне «Академик Борис Петров» в 43-м (27–30 июля 2018 г.) и 49-м (1–23 июня 2022 г.) рейсах. Работы проводились в исключительной экономической зоне Российской Федерации Балтийского моря.

Отбор проб зоопланктона осуществляли с использованием сетки WP-2 диаметром 56 см и размером ячеей 100 мкм. Методика включала тотальные ловы от придонного слоя до поверхности, а также раздельное облавливание различных горизонтов водной толщи с применением замыкателя. Выделяли три основных слоя: верхний квазиоднородный слой, промежуточный слой между верхними границами галоклина и термоклина, а также глубинный слой от дна до верхней границы галоклина.

Определение границ отбора проб проводили на основании данных вертикального CTD-зондирования с использованием зонда Idronaut OS316 Plus. Это позволяло оперативно фиксировать положение термо- и галоклина на

каждой станции. После сбора пробы консервировали формалином до конечной концентрации 4% для последующего лабораторного анализа.

Обработку проб выполняли в соответствии с общепринятыми методиками, включая камеральные и статистические процедуры. Расчет биомассы проводили на основе зависимостей массы организмов от их длины, используя установленные регрессионные модели. Таксономическая идентификация организмов проведена с опорой на современные базы данных WoRMS и ITIS, что обеспечило соответствие современным систематическим стандартам.

Полученные данные позволили детально изучить вертикальное распределение зоопланктона в различных гидрологических слоях. Особое внимание уделялось анализу пространственной изменчивости сообществ в условиях стратифицированной водной толщи. Результаты исследований представляют ценность для понимания трофических взаимодействий в пелагиали Балтийского моря.

Собранный материал дает возможность оценить особенности распределения кормовой базы для рыб-планктофагов на разных глубинах. Это имеет важное значение для изучения экологии промысловых видов, чьи личиночные и мальковые стадии зависят от доступности зоопланктона. Проведенные исследования вносят вклад в мониторинг состояния экосистемы Балтийского моря.



Рисунок 2 - Схема расположения станций отбора проб зоопланктона Балтийского моря

Пространственное распределение зоопланктона было проанализировано с использованием геоинформационных технологий в программной среде ArcGIS. Визуализация данных осуществлялась посредством приложения ArcMap, предоставляющего широкие возможности для применения различных методов интерполяции. В исследовании рассматривались как детерминированные, так и геостатистические подходы к анализу пространственных закономерностей.

Геостатистические методы требуют проведения предварительного статистического анализа данных, тогда как детерминированные подходы основаны на математических функциях и могут быть эффективно использованы при ограниченном количестве точек отбора проб. Учитывая относительно небольшое число станций наблюдения, предпочтение было отдано детерминированным методам интерполяции, не нуждающимся в сложной статистической подготовке исходных данных.

Для выбора оптимального метода интерполяции проводилось сравнение различных пространственных моделей, полученных с использованием разных алгоритмов. Критерием оценки точности интерполяции служило сопоставление расчетных значений с фактическими данными в исключенной контрольной точке. В результате проведенного анализа наиболее адекватные результаты показал метод "Сплайн с барьерами", реализованный в модуле Spatial Analyst.

Данный метод продемонстрировал хорошую сходимость с эмпирическими данными и позволил учесть естественные границы исследуемой акватории. Применение сплайновой интерполяции с учетом барьеров обеспечило плавное изменение значений между станциями при сохранении достоверности пространственного распределения. Полученные карты отражают закономерности распределения зоопланктона с учетом особенностей гидрологической структуры водной толщи.

Использование геоинформационных технологий существенно повысило точность визуализации пространственных закономерностей. Метод "Сплайн с барьерами" оказался особенно эффективным для отображения плавных градиентов распределения биологических показателей. Результаты интерполяции позволяют выявить зоны концентрации зоопланктона и их связь с гидрологическими характеристиками среды.

Проведенный анализ пространственного распределения имеет важное значение для понимания структуры пелагических сообществ. Полученные карты могут служить основой для моделирования трофических взаимодействий в экосистеме Балтийского моря. Примененные методы визуализации данных обеспечивают надежную интерпретацию результатов и способствуют более глубокому пониманию закономерностей распределения биологических компонентов.

2.2. Анализ динамики численности и биомассы зоопланктона

Летний зоопланктонный комплекс (голопланктон) Балтийского моря по результатам исследований 2018 и 2022 годов включал 29 таксонов различного систематического уровня. Таксономический состав характеризовался преобладанием копепод (11 видов), за которыми следовали ветвистоусые ракообразные (9 видов) и коловратки (5 видов). В составе мезопланктона были идентифицированы личиночные формы бентосных организмов, включая полихет, двустворчатых и брюхоногих моллюсков, усоногих раков, а также икру рыб.

Фаунистический анализ выявил преобладание эвригалинных видов бореального происхождения, способных существовать в широком диапазоне солености. В составе сообщества зарегистрированы четыре интродуцированных вида, представляющих разные биогеографические регионы: понто-каспийские кладоцеры *Cercopagis pengoi* и *Evadne anonyx*, а также атлантические вселенцы - веслоногий рачок *Acartia tonsa* и гребневик *Mnemiopsis leidyi*.

Пространственное распределение зоопланктона демонстрировало выраженные различия между прибрежными и пелагическими биотопами. Прибрежные воды отличались повышенным таксономическим разнообразием, особенно среди коловраток и ветвистоусых ракообразных, что связано с влиянием речного стока. В этих биотопах доминировали представители рода *Synchaeta*, тогда как вид *Keratella quadrata* показал четкую приуроченность к литоральной зоне.

Пелагиаль характеризовалась присутствием типично морских видов, включая аппендикулярию *Fritillaria borealis* и сцифоидных медуз *Aurelia aurita* и *Cyanea* sp. В глубоководных районах отмечено массовое развитие холодноводного копепода *Pseudocalanus acuspes* (ранее идентифицировавшегося как *P. elongatus*), что отражает его предпочтение к водам с пониженной температурой и повышенной соленостью.

Меропланктонное сообщество в прибрежной зоне отличалось значительным разнообразием, включая личинки различных бентосных организмов. Такое распределение демонстрирует тесную связь между донными и пелагическими экосистемами в мелководных районах. Полученные данные подчеркивают важную роль гидрологических факторов в формировании пространственной структуры зоопланктонного сообщества Балтийского моря.

Таблица 1 - Список видов летнего зоопланктона Балтийского моря по данным двух лет

№ пп	Группы, виды / годы	2018	2022
Тип Rotifera			
1	<i>Asplanchna priodonta</i> Gosse, 1850	—	+
2	<i>Synchaeta</i> spp.	+	+
3	<i>Synchaeta monopus</i> Plate, 1889	+	+
4	<i>Keratella quadrata</i> (O.F. Müller, 1786)	+	+
5	<i>Trichocerca elongata</i> (Gosse, 1886)	—	+
6	<i>Brachionus</i> spp.	+	+
7	<i>Filinia longiseta</i> (Ehrenberg, 1832)	+	+
Тип Arthropoda / Подтип Crustacea			
Класс Branchiopoda / Надотряд Diplostraca			
8	<i>Eubosmina maritima</i> (P.E. Müller, 1867)	+	+
9	<i>Evadne nordmanni</i> Lovén, 1836	+	+
10	<i>Evadne anonyx</i> G.O. Sars, 1897	+	—
11	<i>Pleopsis polyphemoides</i> (Leuckart, 1859)	+	+
12	<i>Podon intermedius</i> Lilljeborg, 1853	+	+
13	<i>Cercopagis pengoi</i> (Ostroumov, 1989)	+	+
14	<i>Chydorus sphaericus</i> (O.F. Müller, 1785)	—	+
15	<i>Daphnia galacata</i> Sars, 1864	—	+
16	<i>Bosmina coregoni</i> Baird, 1857	+	+

Класс Copepoda / Отряд Calanoida			
17	Acartia longiremis(Lilljeborg, 1853)	+	+
18	Acartia tonsaDana, 1849	+	+
19	Acartia bifilosa(Giesbrecht, 1881)	+	+
20	Centropages hamatus(Lilljeborg, 1853)	+	+
21	Temora longicornis(Müller O.F., 1785)	+	+
22	Pseudocalanus acuspes(Giesbrecht, 1881)	+	+
23	Eurytemora affinis(Poppe, 1880)	+	+
24	Limnocalanus macrurus(Sars, 1863)	+	+
25	Cyclops strenuus(Fischer, 1851)	+	+
Отряд Cyclopoida			
26	Oithona similisClaus, 1866	—	+
27	Mesocyclops leuckarti leuckarti(Claus, 1857)	—	+
28	Cryptocyclops bicolor(Sars G.O., 1863)	—	+
Отряд Harpacticoida			
29	Harpacticus uniremis(Giesbrecht, 1881)	+	+
30	Tisbe spp.	+	+
Отряд Mysida			
31	Mysis relictaLoven, 1860	+	+
32	Neomysis integer(Leach, 1814)	+	+
33	Paramysis spp.	+	+
Тип Chordata / Класс Appendicularia			
34	Fritillaria borealisLohmann, 1896	+	+
35	Oikopleura dioicaFol, 1872	+	+
Тип Cnidaria / Класс Scyphozoa			
36	Aurelia aurita(Linnaeus, 1758) эфиры	—	+
37	Cyanea sp.эфиры	—	+
38	Pelagia noctiluca(Forsskål, 1775)	±	±

Тип Ctenophora / Класс Tentaculata			
39	Mnemiopsis leidyi A. Agassiz, 1865	—	+
40	Beroe ovata (Bruguère, 1789)	—	+
Меропланктон			
41	Личинки Polychaeta	+	+
42	Личинки Bivalvia	+	+
43	Личинки Gastropoda	+	+
44	Науплии Cirripedia	+	+
45	Икринки рыб (Pisces eggs)	+	+

Зоопланктонное сообщество Балтийского моря демонстрировало четкую пространственную дифференциацию по доминирующим видам. В пелагиали преобладали копеподы *Acartia longiremis*, *Centropages hamatus*, *Temora longicornis* и *Pseudocalanus acuspes*, тогда как в прибрежных биотопах доминировали *Temora longicornis*, *Acartia bifilosa* и *Acartia tonsa*. Среди кладоцер наибольшую численность показали *Bosmina maritima* и *Evadne nordmanni*.

Количественное распределение зоопланктона характеризовалось выраженной вертикальной стратификацией. Веслоногие ракообразные составляли основу биомассы во всей водной толще, тогда как ветвистоусые достигали высокой численности преимущественно в поверхностных горизонтах. Такая пространственная структура сообщества отражает адаптацию различных таксономических групп к специфическим гидрологическим условиям разных биотопов.

Полученные данные свидетельствуют о значительном вкладе копепод в формирование общей биомассы зоопланктона Балтийского моря. Наблюдаемое распределение демонстрирует тесную связь между видовым составом и экологическими условиями различных частей акватории.

Таблица 2 - Доля планктонных ракообразных в общей биомассе зоопланктона (%) Балтийского моря

Год	2018		2022	
Слой воды, м	0–20	0–дно	0–30	0–дно
Copepoda	65–95	70–99	50–94	60–97
Cladocera	2–25	1–5	3–40	0.3–20

Изучение пространственного распределения зоопланктона в акватории Балтийского моря (ЮВБ) проводилось на основе анализа биомассы и видового состава летом 2018 и 2022 гг. Поскольку более стабильным показателем для оценки состояния сообщества является не численность, а биомасса, были построены карты распределения общей биомассы зоопланктона по акватории. В ходе исследования выявлены существенные различия в диапазонах биомассы между указанными годами.

В 2018 году значения биомассы зоопланктона изменялись от 324 до 3217 мг/м³. Максимальные значения были зарегистрированы в районе окончания северного побережья Самбийского полуострова, вдоль Куршской косы, а также вблизи Готландской впадины у российско-литовской границы, где показатель превышал 1000 мг/м³. Эти районы характеризуются благоприятными условиями для развития планктонных организмов, связанными с сочетанием гидрологических параметров и доступностью пищевых ресурсов.

Летом 2022 года общая биомасса зоопланктона была ниже — от 91 до 1600 мг/м³. Наибольшие значения зафиксированы в прибрежной зоне северной части Самбийского полуострова и вблизи склона Готландской впадины. Снижение биомассы в этот период можно частично объяснить понижением температуры воды: летом 2018 года температура поверхностного слоя составляла 20–23 °С, тогда как в 2022 году — 11–16 °С. Такие изменения могли повлиять на уровень метаболической активности, скорость размножения и развитие популяций зоопланктона.

Однако, несмотря на количественное снижение, анализ пространственного распределения общей биомассы позволил выявить сходные районы скопления зоопланктона в оба года. Это может быть связано с устойчивой гидродинамикой вод, особенно в прибрежных районах ЮВБ, где создаются оптимальные условия для формирования локальных зон концентрации фитопланктона — одного из ключевых пищевых ресурсов для большинства видов зоопланктона. Также важно отметить, что особенности батиметрии, такие как наличие обширных мелководных зон (до 40 м) северо-восточнее Самбийского полуострова, способствуют формированию более стабильных гидрологических и гидрохимических условий, что, в свою очередь, благоприятствует развитию фитопланктона и, соответственно, его потребителей — зоопланктона.

Для комплексного понимания динамики зоопланктонного сообщества ЮВБ был проведен анализ вертикального распределения биомассы. Как показали предыдущие исследования, летом зоопланктон демонстрирует выраженную вертикальную стратификацию, при этом максимальная биомасса сосредоточена в верхнем квазиоднородном слое. Однако в 2022 году нами впервые были построены карты распределения общей биомассы зоопланктона по разным слоям воды, что позволило выявить специфические особенности горизонтального распределения отдельных групп и видов.

В поверхностном слое (температура 11–16 °С, солёность 7,5–7,7 PSU) биомасса зоопланктона варьировала от 91 до 2370 мг/м³. Распределение было частично схоже с таковым в целом по столбу воды, при этом наибольшая концентрация наблюдалась в районе мыса Таран. В этом слое преобладали мелкие формы: коловратки (*Asplanchna priodonta*, *Keratella quadrata*), кладоцеры (*Evadne nordmanni*, *Bosmina coregoni*) и науплии морских желудей (*Cirripedia naupii*). Также значительную долю составили представители веслоногих ракообразных: *Acartia* spp., *Centropages hamatus* и *Temora longicornis*, равномерно представленные в сообществе (табл. 3).

В промежуточном слое (термоклин), где температура воды составляла 4,5–9,8 °С, а солёность — 7,5–7,8 PSU, биомасса была распределена более

равномерно и находилась в диапазоне 300–1000 мг/м³. Максимальные значения наблюдались от северного побережья Самбийского полуострова до российско-литовской границы. Здесь значительно снизились доли коловраток и кладоцер, тогда как доминирующими видами стали *Temora longicornis* и *Pseudocalanus acuspes*, которые вместе составили около 65% общей биомассы (табл. 3).

В слое ниже начала галоклина до дна (температура 5–7 °С, солёность 7,8–12,1 PSU) вариации биомассы были наиболее широкими — от 121 до 3170 мг/м³. Максимум биомассы отмечен у склона Готландской впадины, где развивались преимущественно крупные формы — в первую очередь *Pseudocalanus acuspes*, составлявший до 50% общей биомассы в этом слое. Такая структура сообщества указывает на адаптацию отдельных таксонов к условиям повышенной солёности и меньшей температурной изменчивости.

Анализ видового состава зоопланктона по данным двух лет (2018 и 2022) представлен в таблице 1. Общее количество зарегистрированных видов увеличилось с 29 в 2018 году до 45 в 2022 году, что свидетельствует о возрастании разнообразия сообщества. Среди зарегистрированных видов доминировали представители типов Rotifera, Arthropoda (Crustacea), Chordata, Cnidaria и Stenophora. Важнейшую роль в структуре сообщества играли веслоногие ракообразные (Copepoda), в том числе *Acartia longiremis*, *Acartia tonsa*, *Acartia bifilosa*, *Centropages hamatus*, *Temora longicornis*, *Pseudocalanus acuspes*, *Eurytemora affinis*, *Limnocalanus macrurus* и другие. Эти виды являются ключевыми компонентами трофических цепей и индикаторами экосистемных изменений.

Среди Cladocera выделялись *Evadne nordmanni*, *Cercopagis pengoi*, *Bosmina coregoni*, чье присутствие особенно заметно в поверхностных слоях. Отмечено исчезновение *Evadne anonyx* в 2022 году, что может быть связано с изменением солёности или температуры воды. Также впервые в 2022 году были зарегистрированы *Chydorus sphaericus* и *Daphnia galeata*, обычно встречающиеся в пресноводных или слабосолёных условиях, что может говорить о локальном влиянии пресноводных масс в прибрежных районах.

Полученные данные подтверждают важную роль копепод в формировании общей биомассы зоопланктона. В табл. 2 представлены доли Copepoda и Cladocera в общей биомассе по слоям воды. В 2018 году доля Copepoda составляла 65–95% в поверхностном слое (0–20 м) и 70–99% во всей водной толще (0–дно). В 2022 году эти значения немного снизились — до 50–94% и 60–97% соответственно, что может быть связано с относительным увеличением численности других групп, таких как Cladocera и Stenophora.

Доля Cladocera в 2018 году составляла 2–25% в поверхностном слое и 1–5% в водной толще. В 2022 году отмечено увеличение их участия в верхних слоях — до 3–40%, однако в придонных водах их доля оставалась крайне низкой (менее 20%). Это согласуется с известными экологическими характеристиками группы: Cladocera предпочитают теплые, хорошо освещённые и богатые фитопланктоном верхние слои воды.

Зоопланктонное сообщество Балтийского моря демонстрирует чётко выраженную пространственную дифференциацию. В пелагиали доминируют *Acartia longiremis*, *Centropages hamatus*, *Temora longicornis* и *Pseudocalanus acuspes*, тогда как в прибрежных зонах доминируют *Temora longicornis*, *Acartia bifilosa* и *Acartia tonsa*. Среди Cladocera наибольшую численность показывают *Bosmina maritima* и *Evadne nordmanni*, особенно в периоды высокой продуктивности фитопланктона.

Количественное распределение зоопланктона характеризуется выраженной вертикальной стратификацией. Copepoda доминируют во всей водной толще, обеспечивая стабильность трофических взаимодействий. Cladocera, напротив, достигают наибольшей численности в поверхностных слоях, где создаются оптимальные условия для их развития. Подобная структура сообщества отражает адаптацию различных таксономических групп к специфическим гидрологическим условиям разных биотопов.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о значительном вкладе копепод в формирование общей биомассы зоопланктона Балтийского моря. Наблюдаемое распределение видов демонстрирует тесную связь между

структурой сообщества и экологическими условиями различных районов акватории. Для более полного понимания долгосрочных изменений зоопланктонного сообщества необходимы дальнейшие многолетние наблюдения, включающие сезонные и межгодовые колебания, а также анализ влияния антропогенных факторов и климатических изменений (табл. 3).

Таблица 3 - Массовые виды зоопланктона (доля % от общей биомассы) в разных гидрологических слоях ЮВБ, 2022 г.

Виды / Слои воды	ВКС	промежуточный	глубинный
<i>Synchaeta</i> sp.	5–10%	1–3%	—
<i>Evadne nordmanni</i>	4–8%	1–2%	—
<i>Podon intermedius</i>	2–6%	1–3%	—
<i>Pleopsis polyphemoides</i>	1–4%	1–2%	—
<i>Acartia</i> spp.	10–20%	15–25%	5–10%
<i>Centropages hamatus</i>	5–10%	10–15%	5–8%
<i>Temora longicornis</i>	10–15%	20–30%	10–15%
<i>Pseudocalanus acuspes</i>	5–10%	25–35%	30–50%
<i>Cirripedia</i> , nauplii	5–15%	2–5%	—

Пространственная и временная изменчивость биомассы зоопланктона в Балтийском море определяется комплексом факторов, включая видовую структуру сообщества, термохалинные характеристики водных масс, особенности циркуляции и доступность трофических ресурсов в различных горизонтах водной толщи. Проведенные исследования летнего зоопланктона выявили наличие 29 систематических единиц различного таксономического уровня, дополненных временными компонентами меропланктона, представленного личиночными стадиями бентосных организмов и ихтиопланктоном.

Доминирующее положение в зоопланктонном сообществе по показателям биомассы занимали планктонные ракообразные, с явным преобладанием копепод отряда Calanoida. Однако в поверхностных горизонтах на отдельных станциях отмечалось значительное увеличение доли ветвистоусых ракообразных, обусловленное массовым развитием *Evadne nordmanni* и *Bosmina maritima*. Такое вертикальное распределение биомассы отражает экологические предпочтения различных систематических групп и их адаптацию к условиям среды.

Сравнительный анализ межгодовой динамики показал различия в абсолютных значениях биомассы при сохранении общих закономерностей пространственного распределения. Максимальные концентрации зоопланктона в оба года исследования регистрировались в прибрежных акваториях с глубинами до 50 метров, простирающихся от северной оконечности Самбийского полуострова вдоль Куршской косы, а также в районе склона Готландской впадины. Для установления устойчивых пространственных паттернов распределения необходимо привлечение многолетних данных наблюдений.

Исследование вертикальной стратификации зоопланктона Балтийского моря выявило существенные различия в распределении биомассы по водным горизонтам. Эти особенности обусловлены видовым составом доминирующих организмов, сформировавшихся под влиянием специфических термохалинных условий в каждом конкретном слое водной толщи. Наибольшие концентрации биомассы отмечались в горизонтах с оптимальным сочетанием температурных и соленостных характеристик.

Полученные результаты свидетельствуют о тесной взаимосвязи между гидрологическими параметрами среды и структурными характеристиками зоопланктонного сообщества. Пространственное распределение биомассы демонстрирует четкую приуроченность к определенным биотопам, что особенно выражено в прибрежно-морских экосистемах. Выявленные закономерности

отражают комплексное влияние абиотических и биотических факторов на формирование зоопланктонных скоплений.

Проведенные исследования подчеркивают необходимость учета вертикальной стратификации при оценке состояния зоопланктонных сообществ Балтийского моря. Особое значение имеет мониторинг пространственного распределения биомассы, который позволяет выявлять ключевые районы нагула планктоноядных рыб. Полученные данные вносят вклад в понимание трофической структуры пелагиали и могут быть использованы для разработки мер по рациональному использованию биологических ресурсов.

Выводы по главе. Проведённое исследование посвящено анализу динамики численности и биомассы зоопланктона Балтийского моря и его роли в питании промысловых видов рыб. Оно опирается на данные экспедиционных работ, собранные с использованием современных методов отбора проб и анализа водной среды. Применение сплайновой интерполяции с учётом естественных гидрологических барьеров позволило уточнить пространственное распределение зоопланктона и выявить закономерности его концентрации в зависимости от гидрофизических условий. Использование CTD-зондирования обеспечило оперативное определение положения термоклина и галоклина, что оказалось критически важным для корректного разделения водной толщи на слои при отборе проб. Консервация образцов формалином до конечной концентрации 4% позволила сохранить структуру сообщества и обеспечила надёжность лабораторного анализа.

Полученные результаты демонстрируют значительную изменчивость как в горизонтальном, так и в вертикальном распределении биомассы и численности зоопланктона, что обусловлено сложными гидрологическими условиями Балтийского моря и сезонными колебаниями продуктивности фитопланктона. Особое значение имеет выявленная связь между стратификацией водной массы и локализацией основных скоплений зоопланктона, что имеет прямую практическую ценность для прогнозирования доступности кормовой базы для рыб. В работе также показано, что зоопланктон играет ключевую роль в

трофических взаимодействиях экосистемы, являясь мостом между первичным производством и вторичной продукцией, представленной в первую очередь молодью промысловых рыб.

Анализ состава доминирующих видов подтверждает их высокую чувствительность к изменениям солёности, температуры и уровня загрязнения, что делает их потенциальными индикаторами состояния морской среды. Среди наиболее значимых таксонов выделены веслоногие рачки *Pseudocalanus acuspinatus* , *Acartia tonsa* и *Temora longicornis* , а также эндемики, такие как *Limnocalanus macrurus* . Выявленные особенности сезонной динамики этих видов позволяют предположить возможные фенологические сдвиги под влиянием климатических изменений, что требует дальнейшего изучения и учёта в системах управления биоресурсами. Исследование также акцентирует внимание на необходимости укрепления долгосрочного мониторинга, включая расширение сети наблюдательных станций, стандартизацию методов сбора и обработки данных, а также внедрение автоматизированных технологий, таких как автономные ловушки и дистанционное зондирование.

Предложенная система рекомендаций направлена на повышение точности оценок состояния зоопланктонных сообществ и их доступности для рыб, что особенно важно в условиях усиления антропогенного воздействия и климатической неопределённости. Полученные данные могут быть использованы для разработки научно обоснованных мер по охране и рациональному использованию биоресурсов, а также для совершенствования моделей прогнозирования рыбопромысловых запасов. Результаты исследования имеют не только региональное, но и общее научное значение, поскольку они способствуют углублению понимания механизмов функционирования полуизолированных морских экосистем и реакции планктонных сообществ на внешние воздействия.

ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Рекомендации по мониторингу и управлению биоресурсами

Морской зоопланктон постоянно и всё сильнее подвергается воздействию антропогенного изменения климата, что создаёт как краткосрочные, так и долгосрочные угрозы, например, для доступности источников пищи, распространения, репродуктивного успеха и, в конечном счёте, выживания (Le Moullec & Bender, 2022; Bargagli & Rota, 2024). Такие стрессовые факторы, как повышение температуры морской воды, закисление океана и изменения в динамике морского льда, меняют условия окружающей среды, к которым приспособлен зоопланктон (Espinel-Velasco et al., 2023). Более тёплые воды и более продолжительные сезоны открытой воды могут повлиять на время и обилие цветения ледяных водорослей и фитопланктона, нарушая пищевую цепочку зоопланктона, жизненный цикл которого часто идеально вписывается в периоды симпагического (связанного со льдом) и пелагического пиков первичной продукции (Søreide et al., 2010; Renaud et al., 2024).

Многие виды животных в обоих полушариях используют связанные со льдом водоросли в качестве источника пищи (Kohlbach et al., 2016 (Kohlbach et al., 2018)). Этот пищевой ресурс, вероятно, будет доступен в меньшем пространственно-временном диапазоне в ближайшие десятилетия, когда морской лёд будет отступать. Эти изменения окружающей среды, вероятно, приведут к смещению ареала обитания зоопланктона: некоторые виды будут мигрировать на север в поисках более прохладных вод, в то время как другие могут столкнуться с потерей среды обитания (Kuletz et al., 2024).

Хотя некоторые виды зоопланктона могут проявлять краткосрочную устойчивость за счёт адаптивного поведения, такого как изменение маршрутов миграции или сроков размножения, их способность справляться с этими быстрыми изменениями окружающей среды в долгосрочной перспективе может

быть ограничена, и наше понимание потенциальных механизмов адаптации всё ещё находится на начальной стадии. Долгосрочное выживание будет зависеть от темпов изменений и способности популяций зоопланктона эволюционировать и адаптироваться генетически или успешно заселять и обживать регионы, более близкие к их естественным условиям обитания. Если эти экологические стрессы будут усиливаться, как и ожидается, это может серьёзно повлиять на общую структуру и продуктивность полярных морских экосистем (Джонстон и др., 2022).

Кроме того, отчасти из-за изменения окружающей среды, растущее количество антропогенных загрязнителей, таких как стойкие галогенорганические химические вещества, тяжёлые металлы и микропластик (Xie et al., 2022), может оказывать негативное влияние на поведение морских животных и общее состояние их организма (Dietz et al., 2019; Bargagli & Rota, 2022; Borgå et al., 2022). В рамках этого исследования мы стремились определить и изучить роль морского зоопланктона в полярных пищевых цепочках, а также то, как статус-кво меняется под воздействием климата и изменений окружающей среды. Мы собрали пять оригинальных научных работ, в которых исследуются инновационные инструменты для изучения динамики полярного зоопланктона в условиях быстрых изменений.

В двух статьях используются современные молекулярные методы, такие как метабаркодирование ДНК и секвенирование РНК, для изучения рациона питания и реакции на стресс. В одной статье используются полевые данные для изучения сроков репродуктивного развития антарктического криля, в другой моделируется динамика сообщества зоопланктона в условиях изменения климата, а в последней статье рассматривается наше текущее понимание источников металлов и их судьбы в зоопланктоне арктических морских пищевых цепочек.

С помощью современных биомолекулярных методов Дишерейт и др. (2024) изучили рацион арктических амфипод в период полярной ночи, когда в фитопланктоне нет необходимости. Метабаркодирование выявило удивительно

разнообразный состав рациона, включающий студенистый зоопланктон и рыбу. Эти результаты дают новое и интересное представление о том, что медузы обычно считались тупиковой трофической ветвью с низкой питательной ценностью. В работе Мартинеса-Аларкона и др. (2024) секвенирование РНК использовалось в экспериментальном подходе для изучения влияния различных температурных режимов на *Themisto spp.*, ключевых амфипод в арктических пищевых цепочках. Результаты показали, что тепловой стресс по-разному влияет на экспрессию генов у разных видов, что говорит о специфической для каждого вида способности регулировать температуру. Эти результаты важны для нашего понимания способности морских амфипод приспосабливаться к повышению температуры морской воды и вероятности смещения ареала их обитания в условиях потепления в Арктике.

В работе Штейнке и др. (2024) изучается влияние климата и изменчивости окружающей среды на сроки репродуктивного развития самок антарктического криля в районе Антарктического полуострова. Была отмечена выраженная изменчивость в статусе созревания в ходе многолетних наблюдений, а наиболее значимыми факторами этой изменчивости были признаны Южный кольцевой режим и многомерный индекс Эль-Ниньо.

Результаты этой работы особенно полезны для управления промыслом криля и видами, в рацион которых входит криль. Хибино и др. (2025) использовали метод моделирования, чтобы определить влияние морского льда на распределение зоопланктона в северной части Тихого океана. Согласно сценариям значительного потепления, обобщённые модели несходства (GDM) прогнозируют, что сообщества зоопланктона в высоких широтах будут в большей степени подвержены влиянию изменения сроков таяния морского льда и, как следствие, изменениям годовой первичной продукции, чем сообщества на южном шельфе (от северной части Берингова моря до южной части Чукотского моря). Авторы приводят доказательства того, что потепление в Арктике вряд ли приведёт к равномерному повышению первичной продуктивности. В кратком обзоре, подготовленном Халсбэндом и др. (2024), рассматриваются источники и

перенос металлов в арктических морских экосистемах с акцентом на биодоступность различных соединений и их потенциальную токсичность для морских копепод.

Представлена обновленная информация о реакции зоопланктона на воздействие металлов в сочетании с другими стрессовыми факторами, включая повышенную температуру и снижение pH, а также выявлен ряд пробелов в исследованиях. Обсуждаются предложения по направлениям будущих исследований, такие как более глубокое понимание внутривидовых и межвидовых различий в токсичности металлов. В целом, в пяти статьях, посвящённых этой теме, исследуются основные проблемы полярных морских экосистем, такие как повышение температуры океана, изменения в динамике морского льда и влияние изменения климата на воздействие и последствия загрязнения. Понимание этой экологической динамики имеет решающее значение для оценки уязвимости и устойчивости популяций морского зоопланктона к постоянному экологическому стрессу, вызванному различными источниками. Изучение способности зоопланктона справляться с такими изменениями посредством физиологической адаптации, поведенческой и трофической пластичности или смещения ареала обитания имеет решающее значение для оценки того, достаточно ли этих реакций для сохранения их экологической роли в быстро меняющихся полярных экосистемах.

Исследования зоопланктона, ключевого компонента водных экосистем, важны для понимания процессов, происходящих в водоёмах, например, таких как круговорот углерода. Одним из показателей здоровья водоёма является смертность зоопланктона. Высокая доля мёртвых рачков в пробах указывает на неблагоприятные условия: загрязнение, плохие трофические условия или стресс, вызванный токсичными веществами. Однако подсчёт погибших особей зоопланктона — задача не из лёгких. Традиционный метод лова планктона сетью и его окрашивания красителем требует ручной обработки проб, значительных временных затрат, а также квалифицированных специалистов.

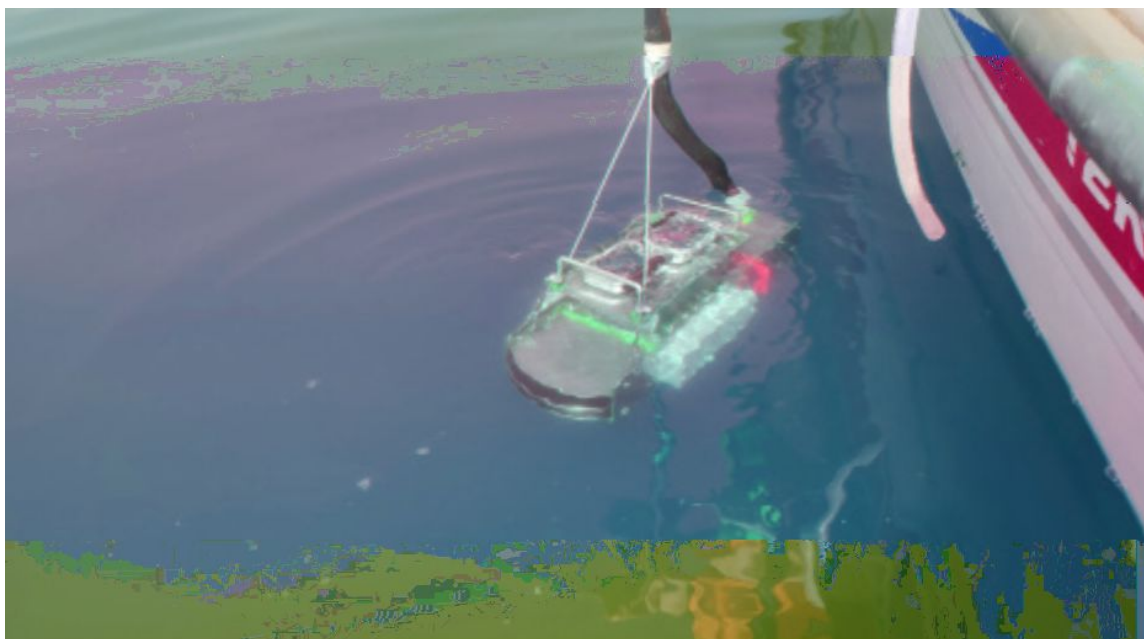


Рисунок 3 - Подводная видеосъемка

Сотрудники Красноярского научного центра СО РАН предложили оценивать обилие планктона в озёрах при помощи подводной видеосъемки и последующего подсчета по записям живых и мёртвых особей при помощи машинного обучения. Они испытали разработанную систему подводной съёмки в шести солёных озёрах Юга Сибири и оценили перспективы её использования для изучения естественной смертности зоопланктона.

Погружная система использует экшен-камеры, которые снимают видео под водой в проточной камере. На видео учёные могут различить живых и мёртвых рачков по их активности. В будущем специалисты планируют использовать машинное обучение для автоматизации процесса подсчёта. Результаты показали, что в исследованных озёрах в составе зоопланктона в среднем около 5 % рачков мёртвые. Эти данные соответствуют общепринятым значениям для солоноватых и пресноводных экосистем. Низкая и стабильная доля мёртвых особей свидетельствует о том, что в период наблюдений популяции зоопланктона не подвергались значительному стрессу.

Специалисты сравнили предложенный метод с традиционным ловом планктонной сетью и окрашиванием рачков красителем. Результаты, полученные этими методами, были близкими.

«Подводная видеосъёмка может стать эффективным методом изучения естественной смертности зоопланктона. Обычно мы рассчитываем смертность зоопланктона, измеряя соотношение живых и мёртвых организмов в разных слоях воды и скорость их погружения с помощью специальных ловушек, установленных в озеро. Подводная видеосъёмка может решить некоторые проблемы, связанные с анализом вертикального распределения живых и погибших организмов в толще воды и определением скорости погружения и точнее отслеживать эти процессы. В настоящее время прототип проточной видеосистемы хорошо справляется с анализом живого зоопланктона. Однако мёртвый зоопланктон имел низкие концентрации в исследуемых озёрах и редко попадал в проточную камеру. Тем не менее, видеосистема позволила провести комплексную оценку численности мёртвого зоопланктона во всей толще воды. Следующим шагом в улучшении процедуры станет модификация видеосистемы для изучения объектов с низкой концентрацией и использования методов машинного обучения для автоматизации классификации, обработки и анализа видеоданных», — отметил старший научный сотрудник Института биофизики СО РАН кандидат биологических наук Александр Толмеев.

Зоопланктон играет ключевую роль в экосистеме Балтийского моря, являясь основным промежуточным звеном между первичной продукцией фитопланктона и более высокими трофическими уровнями, включая промысловые виды рыб. Его состояние напрямую влияет на динамику популяций таких объектов рыболовства, как сельдь (*Clupea harengus membras*), шпрот (*Sprattus sprattus balticus*), молодь трески (*Gadus morhua callarias*) и других видов. В условиях антропогенного воздействия, климатических изменений и эвтрофикации необходимость комплексного подхода к мониторингу и управлению биоресурсами становится особенно актуальной. Ниже представлены рекомендации по оптимизации систем наблюдения за

состоянием зоопланктона и использованию полученных данных для устойчивого управления морскими ресурсами (таблица 4).

Таблица 4 - Рекомендации по оптимизации мониторинга зоопланктона и управлению биоресурсами Балтийского моря

Направление рекомендаций	Конкретные меры	Ожидаемый результат
1. Укрепление долгосрочного мониторинга	<ul style="list-style-type: none"> • Расширение сети станций (Финский, Рижский заливы, прибрежные зоны). • Увеличение частоты экспедиций (весна–лето). • Внедрение автономных ловушек и дистанционного зондирования. • Стандартизация методик (сети WP-2, протоколы обработки). 	Повышение точности и сопоставимости данных, выявление пространственно-временных изменений.
2. Изучение вертикального распределения	<ul style="list-style-type: none"> • Учет слоёв водной толщи (поверхностный, термоклин, глубинный). • Интеграция STD-зондирования. • ГИС-картографирование скоплений зоопланктона. 	Понимание связи между гидрологией и трофической структурой, выявление ключевых кормовых зон для рыб.
3. Зоопланктон как индикатор экосистемы	<ul style="list-style-type: none"> • Мониторинг ключевых видов (<i>Pseudocalanus acuspes</i>, <i>Acartia tonsa</i> и др.). • Анализ сезонных сдвигов («phenological mismatch»). • Оценка влияния загрязнений (ПХБ, тяжёлые металлы). 	Раннее обнаружение экологических угроз, адаптация мер охраны.
4. Учёт в прогнозировании рыбных запасов	<ul style="list-style-type: none"> • Модели связи биомассы зоопланктона и воспроизводства рыб (сельдь, шпрот). • Анализ пространственного совпадения молоди рыб и зоопланктона. 	Точные прогнозы запасов, снижение риска перелова.

Направление рекомендаций	Конкретные меры	Ожидаемый результат
	<ul style="list-style-type: none"> • Оценка качества пищи (энергетическая ценность, токсины). 	
5. Адаптация к климатическим изменениям	<ul style="list-style-type: none"> • Отслеживание сдвигов в доминирующих видах. • Прогнозирование изменений трофических цепей. • Корректировка квот с учётом доступности кормовой базы. 	Устойчивое рыболовство в условиях меняющегося климата.
6. Снижение антропогенного воздействия	<ul style="list-style-type: none"> • Контроль стока биогенов (борьба с эвтрофикацией). • Ограничение рыболовства в районах нагула молоди. • Мониторинг инвазивных видов (<i>Mnemiopsis leidyi</i>). 	Сохранение биоразнообразия и продуктивности экосистемы.
7. Международное сотрудничество	<ul style="list-style-type: none"> • Создание единой базы данных (HELCOM, ICES). • Совместные проекты по изучению долгосрочных изменений. • Разработка экосистемных рекомендаций для управления. 	Согласованные меры по защите моря, эффективное использование ресурсов.
8. Образование и просвещение	<ul style="list-style-type: none"> • Обучение специалистов (ДНК-баркодирование, ГИС). • Информирование рыбопромышленников о роли зоопланктона. • Поддержка молодых учёных (гранты, стажировки). 	Внедрение современных методов, повышение экологической ответственности, развитие научного потенциала.

1. Укрепление системы долгосрочного мониторинга зоопланктона

Существующие программы наблюдения, такие как HELCOM (Хельсинкская комиссия) и ZMP (ICES Zooplankton Monitoring Programme), обеспечивают регулярный сбор данных о состоянии зоопланктона в разных

районах Балтийского моря. Однако для повышения их информативности рекомендуется:

- Расширение сети стационарных станций , особенно в малоизученных регионах — Финском, Рижском заливах, а также в прибрежных зонах, где наблюдается наибольшая пространственная изменчивость.
- Увеличение частоты экспедиционных работ , особенно в весенне-летний период, когда происходит массовое развитие зоопланктона и активное питание молоди рыб.
- Внедрение автоматизированных методов отбора проб , включая использование автономных планктонных ловушек и систем дистанционного зондирования, что позволит увеличить объём собираемых данных и повысить их точность.
- Стандартизация методик сбора и анализа проб , включая применение единых сетей (например, WP-2 с ячейей 100 мкм), протоколов обработки образцов и таксономической идентификации, что обеспечит сопоставимость данных между странами региона.

2. Интеграция вертикального распределения зоопланктона в мониторинг

Анализ вертикальной стратификации зоопланктона позволяет выявлять закономерности его распределения в зависимости от гидрологических условий. Для более полного понимания трофодинамики в экосистеме необходимо:

- Обязательный учет вертикального профиля водной толщи при отборе проб, включая разделение на поверхностный слой (до термоклина), промежуточный (термоклин) и глубинный (ниже пикноклина).
- Интеграция CTD-зондирования в каждую рейсовую программу для получения оперативной информации о температуре, солёности и плотности воды, что важно для интерпретации результатов.
- Картографирование вертикального распределения биомассы зоопланктона с помощью ГИС-технологий (ArcGIS), что позволяет выявлять зоны концентрации кормовой базы для рыб.

3. Использование зоопланктона как индикатора экосистемного состояния

Зоопланктон является чувствительным индикатором изменений окружающей среды, поскольку его численность и состав зависят от множества факторов: температуры, солёности, уровня загрязнения, доступности пищи и давления хищников. Для эффективного управления биоресурсами рекомендуется:

- Включение ключевых видов зоопланктона в список экосистемных индикаторов , в частности:

- *Pseudocalanus acuspes* (чувствителен к снижению солёности),
- *Acartia tonsa* (реагирует на потепление),
- *Limnocalanus macrurus* (эндемик, чувствителен к гипоксии).
- Мониторинг сезонной динамики , особенно в связи с возможными «phenological mismatches» — несоответствием между пиками развития зоопланктона и временем питания молоди рыб.

- Интеграция данных о загрязнении среды (концентрации ПХБ, ПАУ, тяжёлых металлов) с данными по биомассе и структуре сообщества зоопланктона для оценки токсикологического воздействия.

4. Учет роли зоопланктона в питании рыб при прогнозировании рыбных запасов

Поскольку большинство промысловых видов рыб зависят от зоопланктона на ранних стадиях жизни, необходимо развивать подходы, учитывающие трофические взаимодействия:

- Разработка моделей зависимости между биомассой зоопланктона и успехом воспроизводства рыб , особенно сельди и шпрота, которые полностью зависят от него на всех этапах жизни.

- Интеграция данных о пространственном совпадении скоплений зоопланктона и молоди рыб в модели прогнозирования запасов, что повысит точность оценок рыбопромысловых ресурсов.

- Оценка качества пищи (энергетическая ценность, наличие неперевариваемых форм фитопланктона, токсинов) как фактора, влияющего на выживаемость личинок рыб.

5. Разработка мер по адаптации рыбопромысловой деятельности к изменениям климата

Климатические изменения уже оказывают влияние на гидрологический режим Балтийского моря, что отражается на структуре зоопланктонных сообществ:

- Мониторинг межгодовых колебаний доминирующих видов зоопланктона для выявления климатически обусловленных сдвигов.
- Прогнозирование изменений в трофических связях под действием потепления, снижения солёности и усиления стратификации водной толщи.
- Корректировка промысловых квот с учётом изменений в доступности кормовой базы, особенно для видов, полностью зависящих от зоопланктона (шпрот, сельдь).

6. Учет влияния антропогенных факторов на зоопланктонные сообщества

Балтийское море испытывает значительное антропогенное воздействие, включая загрязнение, эвтрофикацию и рыболовство. Для минимизации негативного влияния рекомендуется:

- Контроль стока биогенных элементов с суши , особенно в прибрежных районах, чтобы предотвратить чрезмерное развитие фитопланктона и последующее снижение качества пищи для зоопланктона.
- Ограничение рыболовства в районах концентрации молоди рыб , совпадающих со скоплениями зоопланктона, с целью сохранения кормовой базы.
- Мониторинг распространения инвазивных видов , таких как *Mnemiopsis leidyi* , которые могут конкурировать с местным зоопланктоном и нарушать трофические цепочки.

7. Поддержка международного сотрудничества и обмена данными

Экосистема Балтийского моря является трансграничной, поэтому эффективное управление биоресурсами требует координации усилий всех прибрежных государств:

- Создание единой базы данных по зоопланктону , доступной всем участникам HELCOM и ICES, что улучшит качество аналитики и прогнозирования.
- Развитие совместных исследовательских проектов , направленных на изучение долгосрочных изменений зоопланктона и их последствий для рыбных ресурсов.
- Разработка общих рекомендаций по экосистемному подходу к управлению ресурсами , учитывающего трофические связи и устойчивость экосистемы.

8. Образование и повышение осведомлённости

Для успешного внедрения научных результатов в практику управления необходимо:

- Обучение специалистов по современным методам сбора и анализа данных о зоопланктоне , включая ДНК-баркодирование, цифровую микроскопию и ГИС-анализ.
- Информирование общественности и представителей рыбной отрасли о важности зоопланктона как компонента экосистемы и индикатора её здоровья.
- Поддержка молодых учёных , занимающихся исследованиями зоопланктона и трофических связей, через гранты, стажировки и участие в международных программах.

Зоопланктон Балтийского моря — это ключевой элемент морской экосистемы, значение которого выходит за рамки экологических исследований и напрямую связано с устойчивым развитием рыбопромысловой отрасли и продовольственной безопасностью региона. Эффективный мониторинг и управление биоресурсами должны быть основаны на комплексном подходе, который включает долгосрочные наблюдения, вертикальный и пространственный анализ, использование современных технологий и международное сотрудничество. Реализация вышеуказанных рекомендаций позволит не только сохранить здоровье экосистемы Балтийского моря, но и

обеспечить устойчивое использование его биологических ресурсов в условиях быстро меняющегося мира.

Проанализируем также текст, взятый из научной статьи «Эффективная стратегия выживания зоопланктона в условиях турбулентности», посвящён исследованию поведения зоопланктона в турбулентных потоках воды и анализу стратегий их ориентации и движения в таких условиях. В основе исследования лежит гипотеза о том, что организмы, обитающие в водной среде, могут использовать информацию о градиентах сигналов (например, химических или механических) для оптимального перемещения в пространстве, особенно в сложных динамических условиях, таких как турбулентность. Работа сочетает теоретическое моделирование с численными экспериментами, основанными на данных реальных турбулентных потоков.

Центральной задачей исследования является понимание того, как мелкие организмы, такие как зоопланктон, адаптируют свои стратегии плавания в зависимости от изменений окружающей среды. Авторы рассматривают модель поведения зоопланктона, предполагая, что он способен воспринимать градиенты сигнала — например, концентрации пищи или других стимулов — и двигаться в направлении его увеличения. Эта стратегия формализуется в виде уравнения, где скорость изменения ориентации организма зависит от скалярного продукта между единичным вектором направления движения и градиентом сигнала. Такой подход позволяет смоделировать движение организма в трёхмерном пространстве под действием внешних факторов.

Анализ показывает, что эффективная стратегия перемещения не обязательно требует сложного вычислительного процесса. Например, в случае, когда организм ориентируется вдоль оси, соответствующей его продольной оси («хвост–антенны»), достаточно измерять знак градиента сигнала в этом направлении. Это позволяет существенно упростить механизм навигации, сохраняя при этом высокую степень адаптивности к изменению условий среды. Более того, авторы демонстрируют, что даже в условиях сильной

турбулентности такой алгоритм может быть более эффективным, чем случайное блуждание или пассивное переносимое течение.

Для проверки гипотезы были проведены численные эксперименты с использованием моделей турбулентности различной интенсивности. В частности, применялись три типа моделирования: стохастическая модель турбулентности, прямое численное моделирование (DNS) однородной изотропной турбулентности с числом Рейнольдса $Re\lambda \approx 60$ и DNS турбулентности с $Re\lambda \approx 418$. Эти модели позволяли имитировать реальные условия, в которых находится зоопланктон, и оценивать эффективность различных стратегий перемещения. Результаты показали, что в условиях слабой турбулентности стратегия движения в сторону увеличения сигнала обеспечивает значительно лучшие результаты по сравнению со случайным поиском, тогда как в сильно турбулентной среде эффективность этой стратегии снижается, но остаётся выше уровня случайного поведения.

Особое внимание в работе уделяется роли градиентов скорости деформации потока. В турбулентной среде возникают области с повышенной и пониженной деформацией жидкости, которые могут влиять на распределение организмов. Исследование показало, что зоопланктон имеет тенденцию скапливаться в областях с минимальной деформацией, что может быть связано с минимизацией энергозатрат или снижением риска механического повреждения. Таким образом, помимо химической ориентации, важную роль играет также физическое окружение организма, которое влияет на его поведение и выбор маршрута.

Важным аспектом работы является использование методов машинного обучения и численного моделирования для анализа траекторий движения. Авторы применяли второй порядок метода Адамса–Башфорта для интегрирования уравнений движения, что позволило точно рассчитывать траектории организмов в трёхмерном поле скоростей. Также была разработана система визуализации, позволяющая отслеживать распределение организмов в

пространстве и времени. Это дало возможность наблюдать за тем, как различные стратегии влияют на пространственную структуру популяции.

Работа также содержит ссылки на базы данных турбулентных течений, предоставленные такими организациями, как Johns Hopkins University Turbulence Database, что говорит о её практической направленности и доступности данных для дальнейших исследований. Использование этих данных позволило провести корректное сравнение различных моделей и получить объективные выводы о поведении зоопланктона в разных условиях.

Интересным результатом стало то, что в некоторых случаях изменение стратегии поведения могло оказаться выгодным. Например, если уровень сигнала слишком низок, возможно, целесообразнее сосредоточиться на других целях, таких как минимизация затрат энергии или избегание опасных участков. Однако, как правило, зоопланктон продолжает следовать своей стандартной стратегии, что свидетельствует о её универсальности и эволюционной обоснованности.

Также стоит отметить, что авторы сравнивали поведение активно движущихся организмов с пассивными частицами, имитирующими планктон, который не способен контролировать своё движение. Это позволило выявить преимущества активного поведения и оценить степень его влияния на выживаемость и успешность поиска пищи. Результаты показали, что организмы, использующие стратегию градиентного поиска, имеют значительное преимущество перед пассивными частицами, особенно в условиях переменной среды.

В заключение, представленная работа представляет собой комплексное исследование поведения зоопланктона в турбулентной среде, основанное на принципах биологической физики и численного моделирования. Она демонстрирует, что даже относительно простые стратегии ориентации могут обеспечивать высокую эффективность в сложных условиях. Полученные данные могут быть полезны не только для экологов и биологов, изучающих поведение микроорганизмов, но и для инженеров, разрабатывающих автономные

подводные аппараты, способные ориентироваться в динамических средах. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к созданию более совершенных моделей поведения организмов и новых технологий управления движением в сложных потоках.

3.2. Перспективы дальнейших исследований

Исследования зоопланктона Балтийского моря, несмотря на их долгую историю и значительный объём накопленных данных, продолжают оставаться актуальными и требуют дальнейшего развития в свете современных вызовов, связанных с изменением климата, антропогенным воздействием, трансформацией экосистем и необходимостью устойчивого управления природными ресурсами. Перспективы дальнейших исследований в этой области связаны как с совершенствованием методологической базы изучения зоопланктона, так и с углублением понимания его функциональной роли в трофических сетях и реакции на внешние воздействия.

Одним из ключевых направлений является развитие технологий сбора и анализа данных о зоопланктоне. В настоящее время уже применяются такие подходы, как автоматизированный отбор проб, использование гидрофизических приборов (CTD-зондирование), а также применение ГИС-технологий для пространственно-временного анализа распределения биомассы и численности. Однако перспективным направлением остаётся внедрение новых методов, таких как дистанционное зондирование, подводная видеосъёмка с последующей обработкой изображений с помощью алгоритмов машинного обучения, а также интеграция мобильных лабораторий на борту судов. Это позволит повысить точность и оперативность получения данных, особенно в труднодоступных районах или в условиях сложной гидрологической обстановки. Кроме того, развитие методов ДНК-баркодирования и метабаркодирования открывает возможности для более точной идентификации видового состава зоопланктона,

включая выявление скрытых видов и анализ пищевых связей по содержимому желудков рыб.

Ещё одной важной областью будущих исследований является углублённое изучение вертикальной структуры зоопланктонных сообществ. Несмотря на то, что ряд работ уже демонстрирует значимость учёта вертикального распределения при оценке доступности кормовой базы для рыб, требуется систематический подход к анализу этого параметра во всех регионах Балтийского моря. Особое внимание должно быть уделено взаимодействию зоопланктона с гидрологическими слоями — термоклинном, пикноклинном и оксиклинном, поскольку именно эти границы оказывают влияние на миграции организмов, их доступ к пище и укрытиям от хищников. Развитие моделей, описывающих вертикальные перемещения зоопланктона в зависимости от времени суток, сезона и физико-химических условий водной среды, может способствовать более точному прогнозированию трофических взаимодействий и определению наиболее продуктивных районов для нагула молоди рыб.

Не менее важным представляется развитие исследований, направленных на понимание реакции зоопланктона на комплексное воздействие факторов окружающей среды. Среди них — изменение температуры воды, снижение солёности, увеличение частоты гипоксических событий, загрязнение тяжёлыми металлами и органическими соединениями, усиление эвтрофикации и изменение качества первичной продукции. Особенно актуально это становится в условиях глобального потепления, которое уже провоцирует сдвиги в доминирующих видах зоопланктона. Такие изменения могут повлечь за собой перестройку трофических связей и, как следствие, снижение продуктивности рыбных популяций. Для прогнозирования возможных сценариев развития экосистемы необходимо развитие комплексных моделей, учитывающих как климатические, так и антропогенные факторы.

Изучение роли зоопланктона в питании промысловых видов рыб также требует дальнейшего развития. Хотя известно, что такие виды, как сельдь, шпрот, молодь трески и окунь, зависят от зоопланктона на ранних этапах жизни,

вопросы о качестве пищи, сезонной доступности конкретных групп зоопланктона и межвидовой конкуренции остаются недостаточно изученными. В этом контексте перспективны исследования, основанные на анализе желудочного содержимого с использованием молекулярных маркеров, а также моделирование энергетического бюджета рыб в зависимости от доступности пищи. Также важно учитывать возможные «фенологические дисбалансы» — когда пищевые пики зоопланктона не совпадают по времени с периодом наибольшей потребности в пище у молоди рыб. Эти эффекты могут существенно влиять на выживаемость потомства и воспроизводство популяций.

Дальнейшие исследования должны быть ориентированы на разработку научно обоснованных рекомендаций по управлению биоресурсами. Зоопланктон представляет собой ключевой элемент, через который осуществляется передача энергии от первичных продуцентов к рыбам, поэтому его состояние напрямую влияет на устойчивость рыбных запасов. На основе полученных данных можно разрабатывать модели прогнозирования рыбопромысловых ресурсов, которые будут учитывать не только динамику численности рыб, но и доступность их кормовой базы. Это особенно важно для видов, полностью зависящих от зоопланктона на всех этапах онтогенеза, таких как шпрот и сельдь. Интеграция информации о зоопланктоне в системы управления рыболовством позволит принимать более обоснованные решения относительно допустимых объёмов вылова и мер по сохранению экосистемы.

Большой потенциал имеют международные исследования, направленные на сравнительный анализ состояния зоопланктона в разных регионах Балтийского моря и других водоёмах. Учитывая трансграничный характер экосистемы, координация усилий стран региона через HELCOM, ICES и другие организации играет решающую роль в обеспечении сопоставимости данных и формирования единой стратегии наблюдений. Разработка единых стандартов сбора и обработки данных, создание общедоступных баз данных и проведение совместных экспедиций позволят значительно повысить качество научной информации и её применимость в практике управления.

Важной задачей будущих исследований будет также изучение влияния инвазивных видов на местные зоопланктонные сообщества. Проникновение чужеродных организмов, таких как *Mnemiopsis leidyi*, может привести к нарушению трофических связей, снижению численности автохтонных видов и изменению структуры сообществ. Мониторинг распространения инвазивных видов и оценка их влияния на экосистему должны стать частью регулярных программ наблюдения.

Кроме того, перспективным направлением являются исследования в области биогеохимических циклов и участия зоопланктона в формировании "биологического насоса" углерода. Поскольку зоопланктон активно участвует в вертикальном транспорте органического вещества, его роль в регуляции углеродного цикла становится всё более значимой в условиях изменения климата. Изучение этих процессов может внести вклад в глобальные модели климатических изменений и помочь в оценке потенциальных последствий для морских экосистем.

Образовательная составляющая также должна получить развитие. Подготовка специалистов, владеющих современными методами сбора и анализа данных о зоопланктоне, включая цифровую микроскопию, молекулярную систематику и ГИС-анализ, необходима для обеспечения преемственности научных исследований. Привлечение молодых учёных к участию в проектах, проведение стажировок и семинаров, а также популяризация знаний о значении зоопланктона среди широкой общественности — всё это имеет большое значение для укрепления научного потенциала в области морской экологии.

Таким образом, перспективы дальнейших исследований зоопланктона Балтийского моря связаны с развитием технологий, углублением понимания его экосистемной функции, адаптацией к изменяющимся условиям окружающей среды и интеграцией полученных данных в практику управления биоресурсами. Реализация этих направлений позволит не только сохранить здоровье экосистемы Балтийского моря, но и обеспечить устойчивое использование его биологических ресурсов, включая рыбные запасы, на длительную перспективу.

Выводы по главе. Проведённый анализ современного состояния зоопланктонных сообществ Балтийского моря, его динамики и роли в экосистеме позволил сформулировать ряд практически значимых рекомендаций по мониторингу и управлению биоресурсами, направленных на обеспечение устойчивого использования морских ресурсов и сохранение экосистемного баланса. Эти рекомендации охватывают как методологические аспекты сбора данных, так и подходы к интеграции полученной информации в систему управления рыболовством и охраны окружающей среды.

Одним из ключевых направлений является укрепление долгосрочного мониторинга зоопланктона, который представляет собой основной элемент системы наблюдения за состоянием морской экосистемы. В настоящее время данные собираются в рамках международных программ, таких как HELCOM и ICES ZMP, однако их полнота и пространственная охватываемость требуют дальнейшего расширения. Предложено увеличить количество стационарных станций, особенно в малоизученных районах — Финском и Рижском заливах, а также в прибрежных зонах, где наблюдается наибольшая изменчивость гидробиологических параметров. Это позволит более точно отслеживать региональные особенности и выявлять локальные изменения, которые могут быть связаны с антропогенным воздействием или климатическими факторами.

Важным шагом в развитии мониторинговой системы стало предложение внедрения новых технологий сбора и анализа данных. В частности, использование автономных планктонных ловушек и систем дистанционного зондирования может повысить объём собираемых данных и обеспечить непрерывность наблюдений в труднодоступных условиях. Стандартизация методик сбора проб, включая применение унифицированных сетей (например, WP-2 с ячейёй 100 мкм) и единых протоколов обработки образцов, способствует повышению сопоставимости результатов между странами региона и позволяет формировать базы данных, пригодные для долгосрочных сравнительных исследований.

Ещё одной важной задачей является учёт вертикального распределения зоопланктона при проведении экспедиционных работ. Анализ показал, что различные виды и группы организмов концентрируются в разных слоях водной толщи, что связано с особенностями термоклина, пикноклина и оксиклина. Для повышения точности оценок доступности кормовой базы для рыб рекомендуется обязательное разделение водной массы на поверхностный, промежуточный и глубинный слои. Интеграция CTD-зондирования в каждую рейсовую программу обеспечивает оперативную информацию о температуре, солёности и плотности воды, что необходимо для интерпретации результатов. Кроме того, использование ГИС-технологий (ArcGIS) для картографирования вертикального распределения биомассы зоопланктона позволяет выявлять зоны максимальной продуктивности и использовать эти данные в прогнозировании нагульных районов рыб.

Особое внимание уделено использованию зоопланктона как индикатора экосистемного состояния. Некоторые виды, такие как *Pseudocalanus acuspinatus*, *Acartia tonsa* и *Limnocalanus macrurus*, чувствительны к изменениям солёности, температуры и уровня загрязнения, что делает их удобными объектами для оценки состояния среды. Предложено включить эти таксоны в список ключевых индикаторов и регулярно отслеживать их численность и распределение. Также важно учитывать сезонные колебания и возможные фенологические дисбалансы — несоответствие между пиками развития зоопланктона и временем питания молоди рыб, которые могут возникать вследствие потепления климата.

Управление биоресурсами должно учитывать роль зоопланктона в питании промысловых видов рыб. Исследования желудочного содержимого показали, что большинство рыбных личинок и молоди зависят от зоопланктона как источника пищи, особенно на ранних этапах онтогенеза. Поэтому снижение доступности определённых групп зоопланктона может существенно повлиять на выживаемость молоди и, соответственно, на воспроизводство популяций. Рекомендуется разработка моделей зависимости между биомассой зоопланктона и успехом воспроизводства рыб, а также интеграция данных о пространственном

совпадении скоплений зоопланктона и молоди рыб в модели прогнозирования запасов. Это повысит точность оценок рыбопромысловых ресурсов и обеспечит более эффективное управление выловом.

Анализ влияния антропогенных факторов показал, что эвтрофикация, загрязнение тяжёлыми металлами и органическими соединениями, а также усиление стратификации водной толщи оказывают комплексное воздействие на зоопланктонные сообщества. Предложены меры по контролю стока биогенных элементов с суши, ограничению рыболовства в районах концентрации молоди рыб и мониторингу распространения инвазивных видов, таких как *Mnemiopsis leidyi*. Эти действия должны сопровождаться регулярной оценкой качества воды и состояния кормовой базы, что позволит своевременно реагировать на негативные изменения и принимать корректирующие меры.

Международное сотрудничество играет решающую роль в координации усилий по изучению и охране зоопланктона. Учитывая трансграничный характер Балтийского моря, необходимо развитие совместных исследовательских проектов, создание единой базы данных по зоопланктону и проведение регулярных совместных экспедиций. Это обеспечит сопоставимость данных и позволит формировать общую стратегию наблюдений и управления ресурсами на региональном уровне. Развитие научных контактов между странами региона также способствует обмену опытом, внедрению новых технологий и подготовке специалистов.

Образовательная составляющая должна получить развитие через программы повышения квалификации специалистов, обучение студентов современным методам сбора и анализа данных о зоопланктоне, включая цифровую микроскопию, молекулярно-генетическую идентификацию и ГИС-анализ. Привлечение молодых учёных к участию в проектах, организация стажировок и семинаров, а также популяризация знаний о значении зоопланктона среди широкой общественности являются важными компонентами укрепления научного потенциала в области морской экологии.

Таким образом, представленные в главе рекомендации по мониторингу и управлению биоресурсами охватывают широкий спектр мероприятий, направленных на улучшение качества данных, повышение точности прогнозов рыбопромысловых ресурсов и сохранение экосистемного здоровья Балтийского моря. Их реализация потребует координации усилий научных организаций, государственных органов и международных структур, но позволит достичь более устойчивого и сбалансированного использования морских ресурсов на длительную перспективу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование динамики численности и биомассы зоопланктона Балтийского моря подтвердило его ключевую роль в поддержании устойчивости морской экосистемы. Установлено, что зоопланктон служит основным связующим звеном между первичной продукцией фитопланктона и промысловыми видами рыб, формируя их кормовую базу. Анализ многолетних данных выявил значительные колебания в структуре зоопланктонных сообществ, обусловленные как природными, так и антропогенными факторами. Особое влияние на динамику зоопланктона оказывают климатические изменения, включая повышение температуры воды и снижение солёности, что приводит к сдвигам в видовом составе. Наблюдается сокращение доли холодноводных видов, таких как *Pseudocalanus acuspes*, и увеличение численности теплолюбивых таксонов, включая *Acartia tonsa*.

Пространственное распределение зоопланктона характеризуется выраженной неоднородностью, с максимальными концентрациями в прибрежных районах и зонах гидрологических фронтов. Вертикальная стратификация водной толщи играет важную роль в формировании скоплений зоопланктона, определяя доступность кормовой базы для разных видов рыб. Исследования подтвердили, что молодь сельди, шпрота и трески критически зависит от наличия и качества зоопланктона на ранних стадиях развития. Выявлены случаи фенологического несоответствия между пиками развития зоопланктона и периодами активного питания молоди рыб, что может негативно влиять на воспроизводство популяций.

Антропогенные факторы, включая эвтрофикацию, загрязнение и распространение инвазивных видов, оказывают дополнительное давление на зоопланктонные сообщества. Установлено, что повышение концентрации биогенов способствует развитию фитопланктона, но не всегда приводит к росту биомассы зоопланктона из-за изменения качества пищи. Загрязнение тяжёлыми металлами и органическими соединениями может нарушать репродуктивные

функции зоопланктона, снижая его продуктивность. Инвазивные виды, такие как *Mnemiopsis leidyi*, конкурируют с аборигенными организмами, что может привести к перестройке трофических цепей.

Совершенствование методов мониторинга, включая автоматизированный отбор проб и дистанционное зондирование, позволило получить более точные данные о состоянии зоопланктона. Применение молекулярно-генетических методов, таких как ДНК-баркодирование, расширило возможности идентификации видов и анализа пищевых связей. Интеграция данных о зоопланктоне в модели прогнозирования рыбных запасов повысила точность оценок и позволила учитывать кормовую базу при управлении рыболовством.

Полученные результаты подчёркивают необходимость комплексного подхода к сохранению зоопланктона как основы морской экосистемы. Рекомендовано усилить международное сотрудничество в области мониторинга и обмена данными для разработки согласованных мер управления. Важным направлением является адаптация рыбопромысловой деятельности к изменениям в структуре зоопланктонных сообществ, включая корректировку квот и сроков промысла. Реализация предложенных мер будет способствовать устойчивому использованию биоресурсов Балтийского моря в условиях глобальных изменений.

Исследование подтвердило, что зоопланктон является не только ключевым элементом трофических цепей, но и индикатором состояния морской экосистемы. Дальнейшие исследования должны быть направлены на углублённое изучение механизмов адаптации зоопланктона к изменяющимся условиям среды. Полученные данные имеют практическое значение для разработки стратегий сохранения биоразнообразия и обеспечения продовольственной безопасности региона. В целом, работа вносит вклад в понимание экологических процессов в Балтийском море и предлагает научно обоснованные решения для их устойчивого управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров С. В., Гусев А. А., Семенова А. С. Планктонные и бентосные сообщества юго-восточной части Балтийского моря в летний период 2018–2019 гг. // Океанологические исследования. 2023. Т. 51. № 1. С. 91–113
2. Гущин А. В., Федоров В. Е. Современное состояние промысловой ихтиофауны южной части Балтийского моря как следствие антропогенного воздействия // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. Научно-теоретический журнал. СПб, РГГМУ, 2017. № 49. С. 134–144.
3. Иванова М.Б. Продукция планктонных ракообразных в пресных водах . - Л.: ЗИН АН СССР, 1985.- 222 с.
4. Кормление рыб: краткий курс лекций для студентов III курса направления подготовки 35.03.08 Водные биоресурсы и аквакультура / Сост.: И.В. Поддубная// ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». - Саратов, 2016.
5. Петипа Т.С. Трофодинамика копепод в морских планктонных сообществах. Закономерности потребления и превращения вещества и энергии у особи. – Киев: Наукова Думка, 1981.- 243 с.
6. Полунина Ю. Ю., Родионова Н. В. Характеристика зоопланктонного сообщества // Система Балтийского моря. М.: Научный мир, 2017. С. 258–291.
7. Полунина Ю. Ю., Кречик В. А., Пака В. Т. Пространственная изменчивость зоопланктона и гидрологических показателей вод в южной и центральной части Балтийского моря в позднелетний сезон 2016 г. // Океанология. 2021. Т. 61. №. 6. С. 958–968
8. Секи Х. Органическое вещество в водных экосистемах. - Л.: Госкомгидромет, 1986.- 199 с.
9. Хлюпин, С. А. Вклад зоопарков и питомников в сохранение биоразнообразия / С. А. Хлюпин, Д. И. Клышников // Актуальные вопросы зоологии, экологии и охраны природы. – Москва : СОЗАР, ЕАРАЗА, Академия Принт, Московский зоопарк, 2024. – С. 337-348.

10. Щука Т. А. Зоопланктон. Биологические сообщества // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Т. II: Море / Под ред. Сивкова В. В. и др. Калининград: Терра Балтика, 2012. С. 389–407.
11. Broocks J.L., Dodson S.I. (1965) Predation, body size and composition of plankton. *Science* 150: 28 -35
12. Gliwicz Z.M.(2003) Zooplankton. In: O,Sullivan P.E., Reynolds C.S. (eds.) *The lakes handbook. Vol. 1. Limnology and limnetic ecology*. Malden, Oxford: Blackwell Publishing, p. 461-516.
13. Lampert W. A method for determining food selection by zooplankton. - *Limnol. and. Oceanogr.*- 1974.- 19, N 6.- pp.995-998.
14. Mohrholz V., Naumann M., Nausch G., Krüger S., Gräwe U. Fresh oxygen for the Baltic Sea – an exceptional saline inflow after a decade of stagnation // *J. of Marine Systems*. 2015. V. 148. P. 152–166.
15. Schulz J. et al. Spatial and temporal habitat partitioning by zooplankton in the Bornholm Basin (central Baltic Sea) // *Prog. Oceanogr.* 2012. N 107. P. 3–30.
16. Wasmund N., Dutz J., Pollehne F., Siegel H., Zettler M. Biological Assessment of the Baltic Sea 2015 // *Meereswiss. Ber., Warnemünde*. 2016. V. 102. P. 97.
17. В России усилят контроль за выполнением работ по искусственному воспроизводству водных биоресурсов . - <https://sfera.fm/news/rybnaya/v-rossii-usilyat-kontrol-za-vypolneniem-rabot-po-iskusstvennomu-vosproizvodstvu-vodnykh-bioresursov>
18. Новый способ изучения зоопланктона в озёрах испытан в Хакасии . - <https://new.ras.ru/activities/news/novyy-sposob-izucheniya-zooplanktona-v-ozyerakh-ispytan-v-khakasii/>
19. Эффективная стратегия выживания зоопланктона в условиях турбулентности. - <https://synthical.com/article/Efficient-survival-strategy-for-zooplankton-in-turbulence-b7af6fbf-b2c4-477f-8e48-b2ab55bd92a0/ru>
20. Editorial: Current and Future Threats to Marine Zooplankton in Changing Polar Oceans and Their Potential for Adaption and Coping. -

<https://translated.turbopages.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2025.1627187/abstract>