

Экологический мониторинг акваторий с использованием цифровизации индикаторов жизнедеятельности планктона при помощи погружаемой цифровой голографической камеры

Дёмин Виктор Валентинович

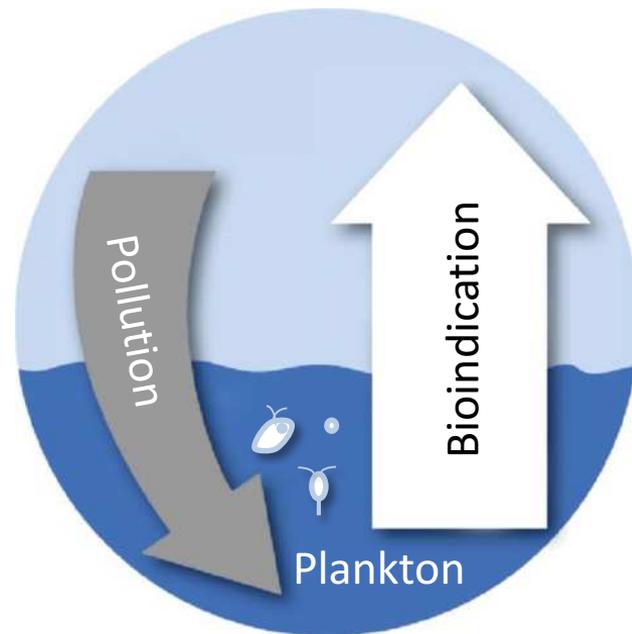
Первый проректор ТГУ,
заведующий лабораторией радиофизических
и оптических методов изучения окружающей среды

+7 903 914 3975

dyomin@tsu.ru

Биоиндикация – оценка степени экологической опасности, установленная на основании реакций живых организмов

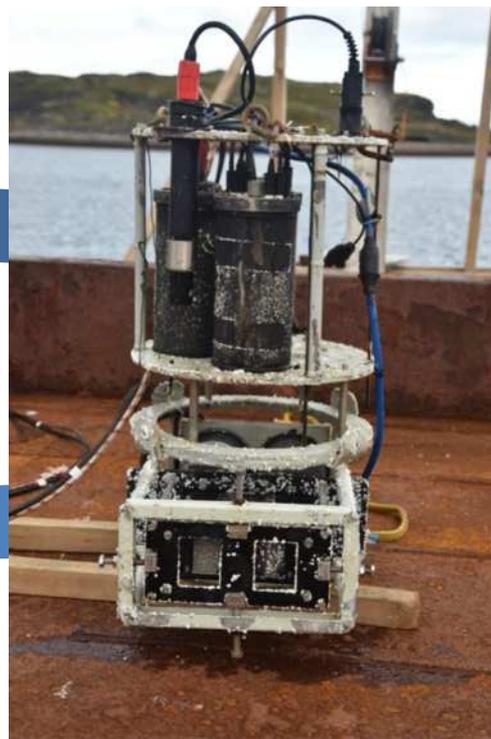
1. Не для всех веществ установлена ПДК
2. Не для всех веществ известны такие их свойства, как изменение токсичности при взаимодействии с сотнями других, недавно созданных, химических веществ
3. Чаще всего ПДК устанавливается в лабораторных условиях на лабораторных тест-организмах, чувствительность которых может отличаться от чувствительности «диких» видов
4. Появление новых классов веществ, таких как наноматериалы, микро- и нанопластик, во всё больших масштабах поступающих в окружающую среду, ставят под сомнение данную возможность из-за немонотонной зависимости «доза-эффект»



Причины использования планктона для целей биоиндикации

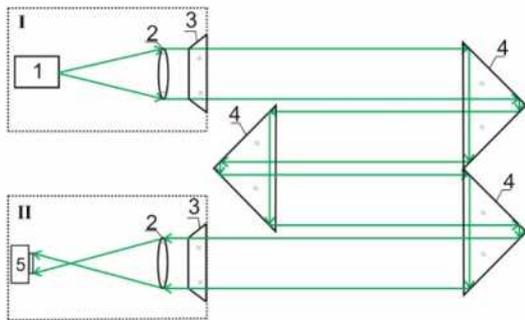
- повсеместное распространение планктона
- значимость для экосистемы
- тесная связь с окружающей средой
- быстрая реакция на загрязнение

**Планктон для биоиндикации
«здесь и сейчас»**



Погружаемая цифровая голографическая камера

Цифровая голографическая камера Digital holographic camera (DHC)



Осевая схема регистрации цифровой голограммы

I – освещающий модуль

II – регистрирующий модуль

1 – лазер

2 – объективы

3 – иллиминаторы

4 – призмы

5 – CMOS камера



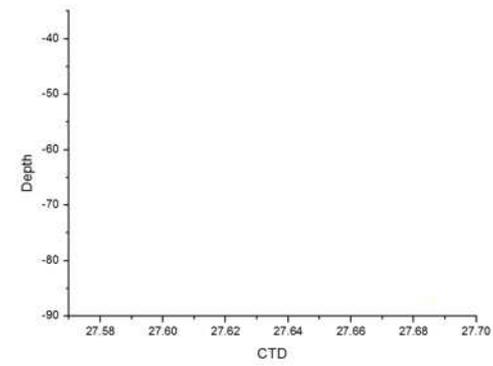
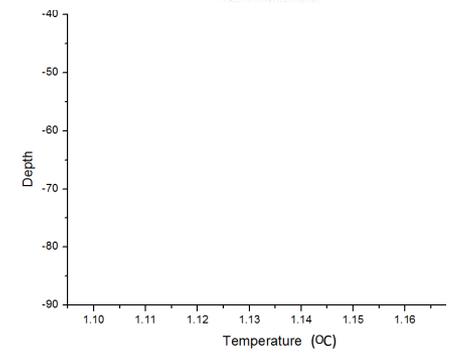
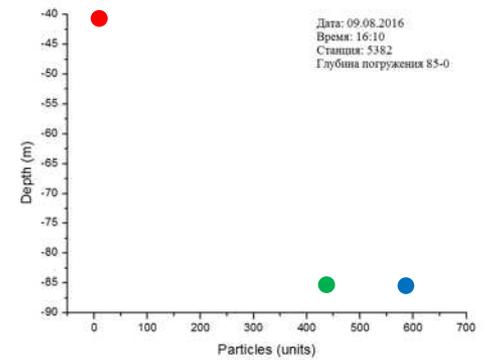
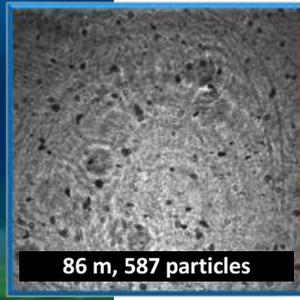
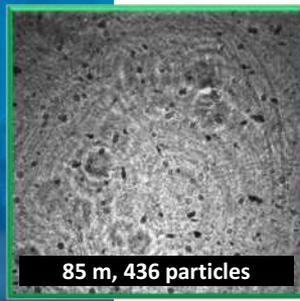
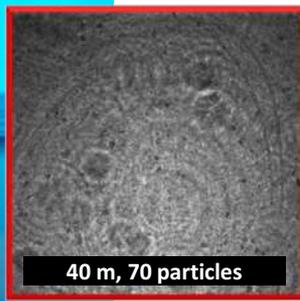
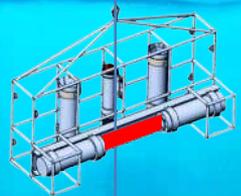
Цифровая голографическая
камера (DHC)



I
Освещающий модуль DHC

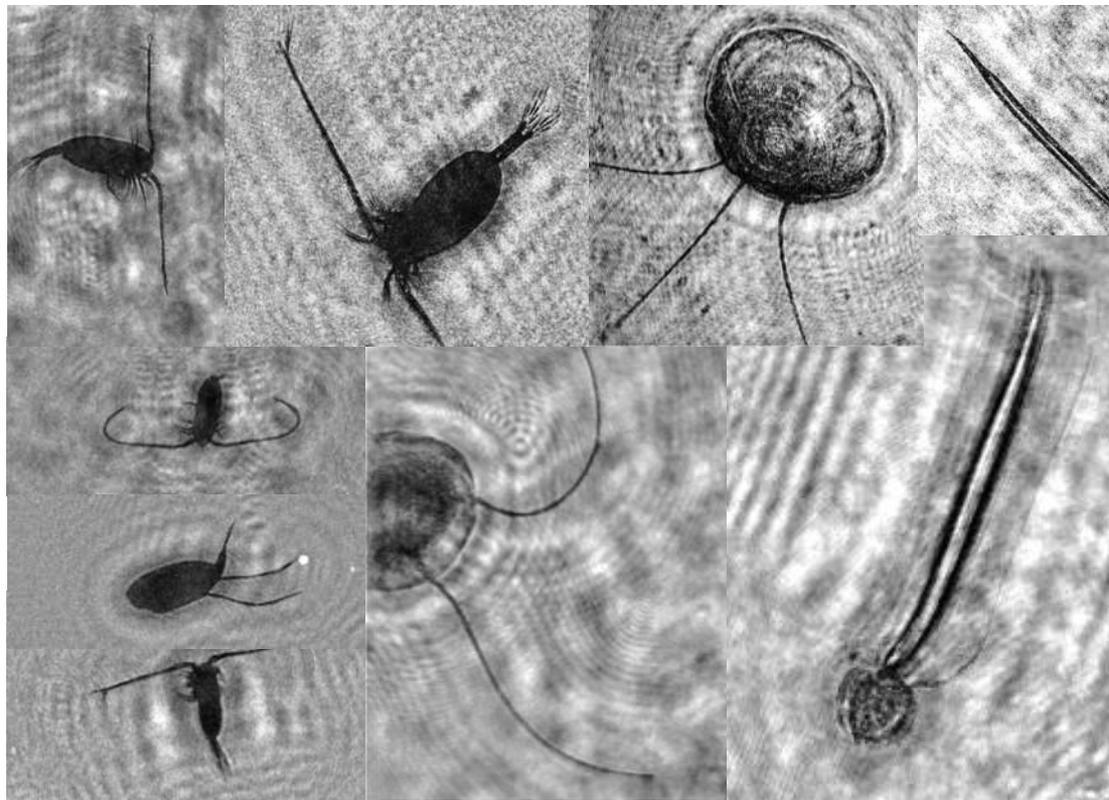


II
Регистрирующий модуль DHC

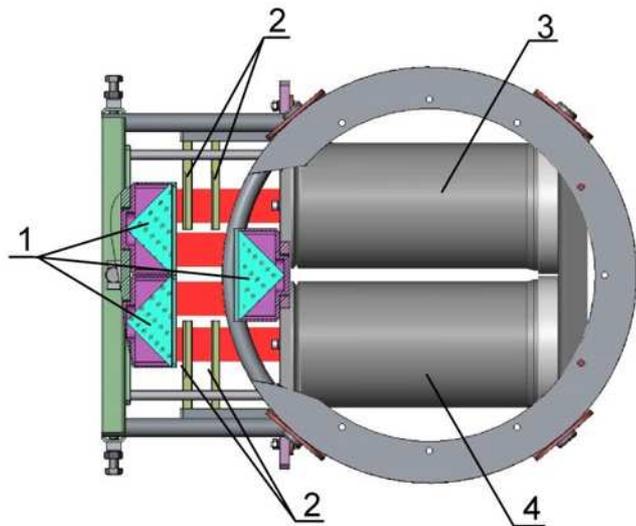


66-я Арктическая экспедиция в Карском море

Голографические изображения морских частиц



Цифровая голографическая камера с аттракторным и регистрирующим светом для изучения поведенческих реакций планктона



- 1 – Призмы
- 2 – Калибры
- 3 – Принимающий блок
- 4 – Передающий блок

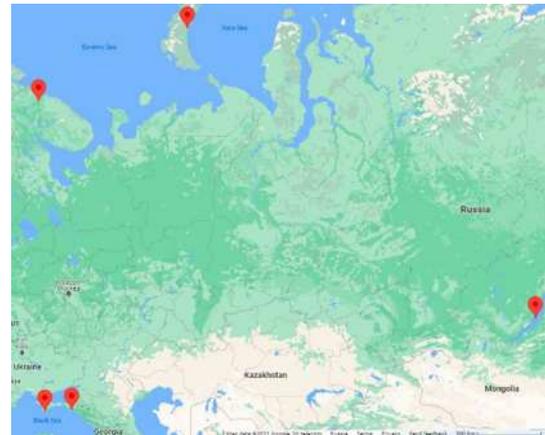


Биоиндикация по изменению поведенческих реакций планктона обеспечивает раннее обнаружение загрязнений

Натурные измерения

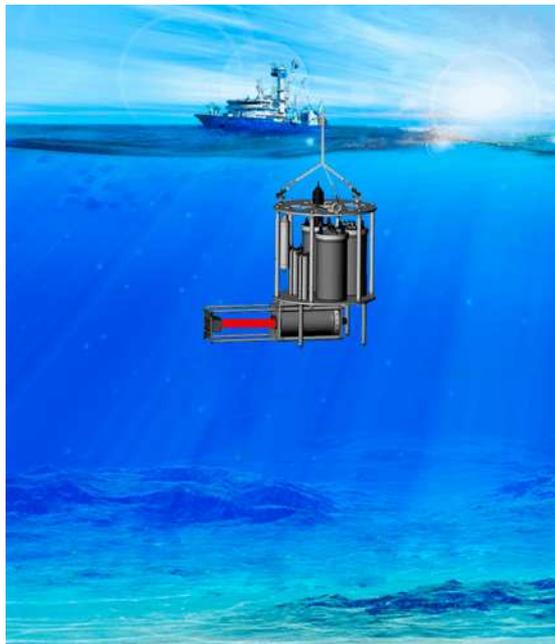
Экспедиции

- Арктическая экспедиция АМК-66 в Карском море, *август 2016*
- Экспериментальная апробация в Кольском заливе в Мурманске, *июнь 2018*
- Экспедиция в Черном море на морском гидрофизическом полигоне около пос. Кацивели, *август 2018*
- Экспедиция в Черном море в Голубой бухте, *2019*
- Международная Арктическая экспедиция, *28 сентября–4 ноября 2020*
- Длительная стоянка на озере Байкал в Больших Котах, *август 2021, февраль–март 2022*
- Длительная стоянка в акватории Зеленецкой губы Баренцева моря, опытный полигон ММБИ (Мурманского Морского Биологического Института) в пос. Дальние Зеленцы, *июль–сентябрь 2022*
- Длительная стоянка на озере Б. Яровое, Алтайский край, *июль 2024*



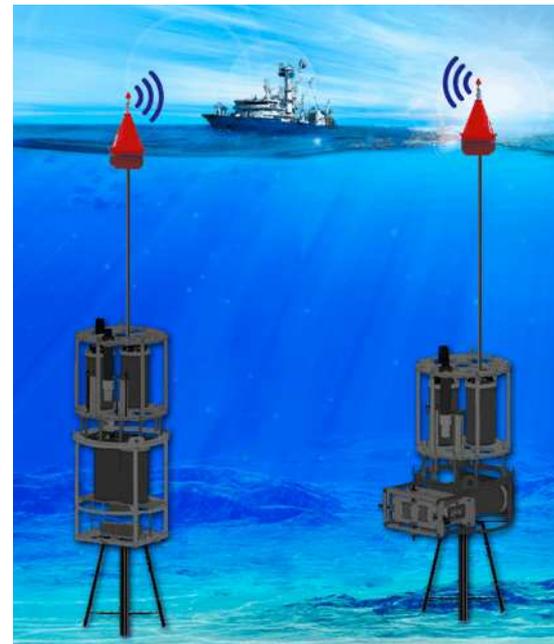
ДНС-сенсорика пространственных и временных распределений взвешенных частиц

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ



- **Измерение интегральных характеристик планктона**
 - средний размер
 - концентрация
 - биомасса
- **Измерение индивидуальных характеристик частиц**
 - размер
 - форма
 - поведенческие реакции
- **Оценка**
 - мутности среды
 - содержания метана
- **Исследование**
 - in situ
 - в реальном времени
 - в сети с другими сенсорами
- **Размещение**
 - на стационарной платформе
 - на буях
 - на борту судов (НИС, рыболовецких и т. д.)
 - АНПА

ВРЕМЕННЫЕ



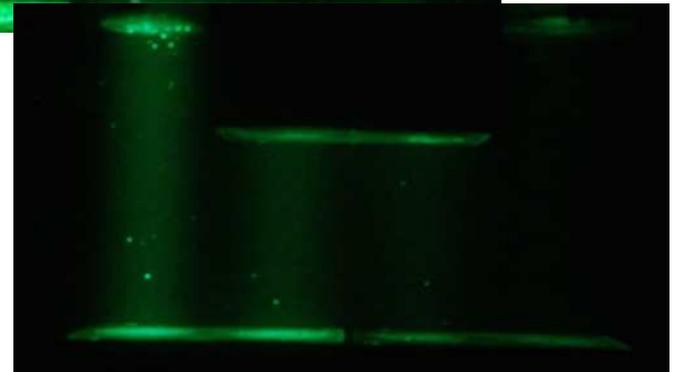
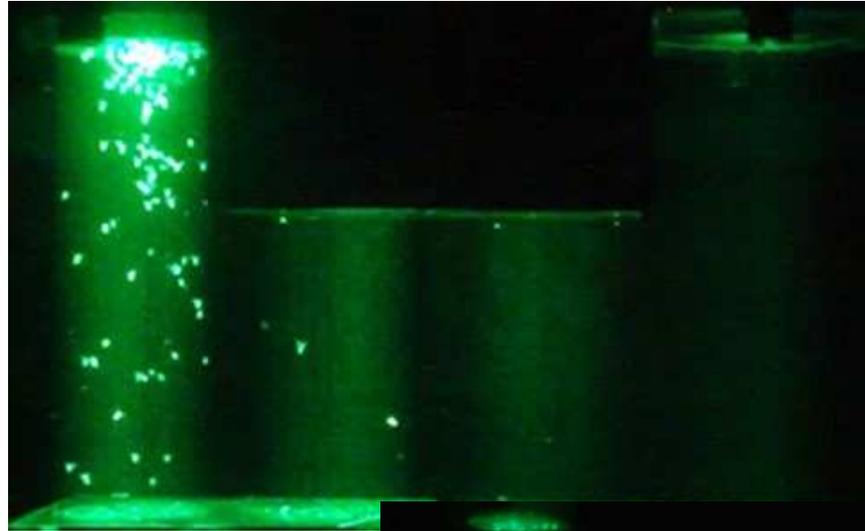
ДНС на ЛСП «Северный полюс»

Два гидробиологических зонда на базе погружаемой цифровой голографической камеры дрейфуют с ЛСП «СП-42»

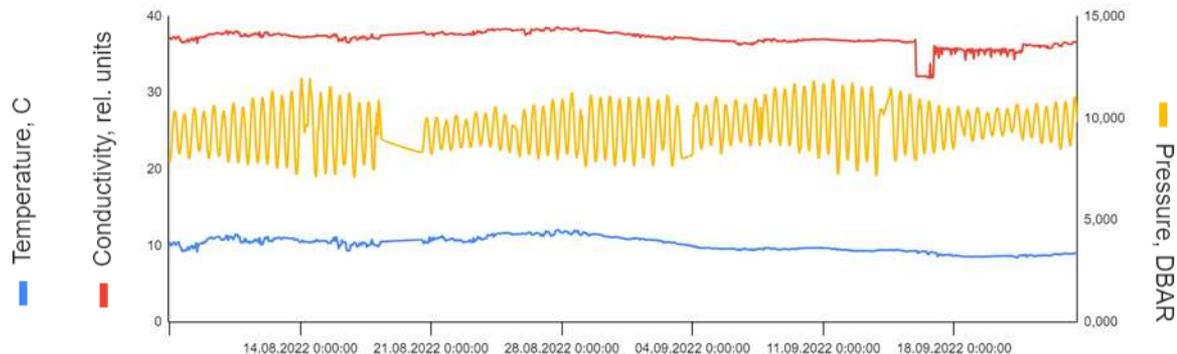
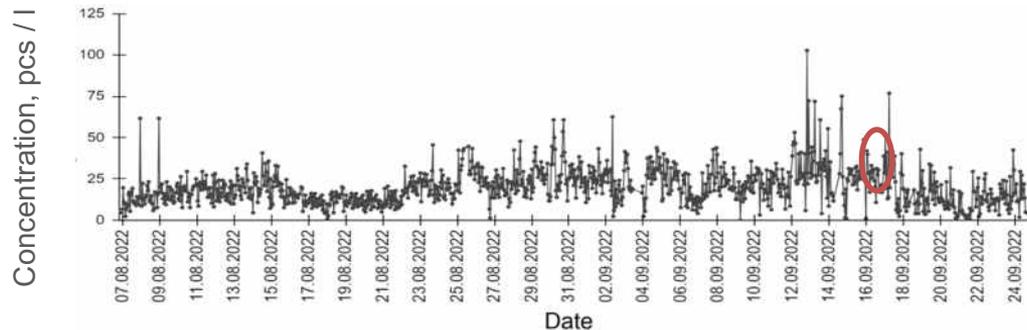


Биоиндикационная роль свободноживущего планктона

1. Высокая чувствительность поведенческих реакций, проявляющаяся при концентрациях токсиканта, на порядки меньших его LC_{50}
2. Не требуются специальное выведение организмов и организация отбора проб
3. Управление масштабом прогноза



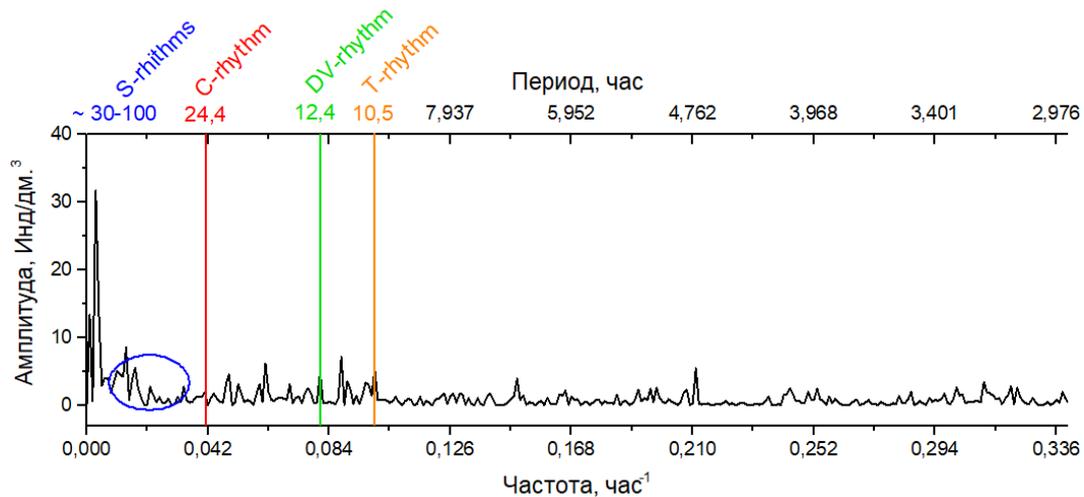
Долгосрочный временной отбор проб – мониторинг параметров планктона



Показатели биоиндикации могут быть рассчитаны на основе временных рядов и их Фурье-спектров:

- фототропный ответ
- амплитуда циркадных и других ритмов
- внутривидовая энтропия
- межвидовая энтропия

Фурье-спектр временного ряда концентрации зоопланктона в рабочем объеме ДНС

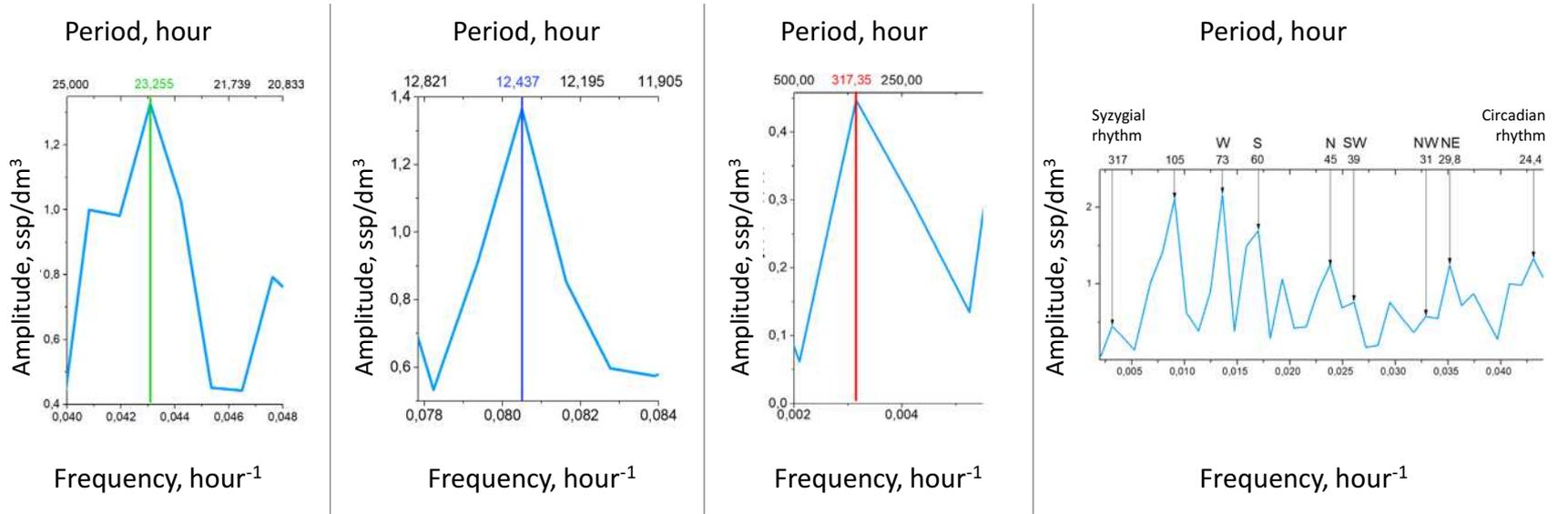


- S – структурирующие ритмы, связанные с турбулентностью (~30–100 час)
- C – циркадный ритм (24,4 час)
- DV – ритм суточной изменчивости (12,4 час)
- T – приливный ритм (10,5 час)



Зонд ДНС, закрепленный на месте швартовки

Синхронизации и ритмика планктонных концентраций



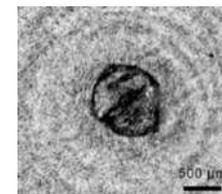
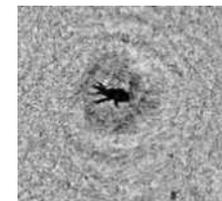
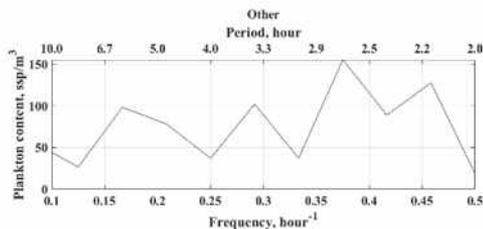
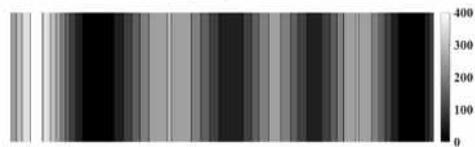
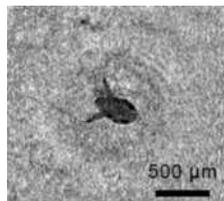
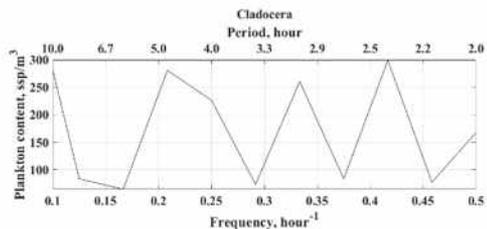
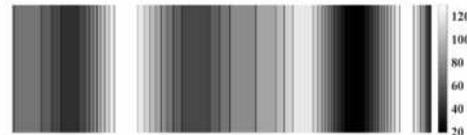
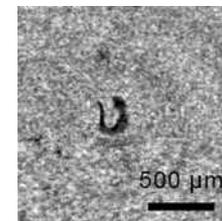
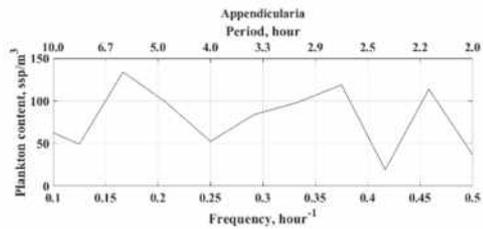
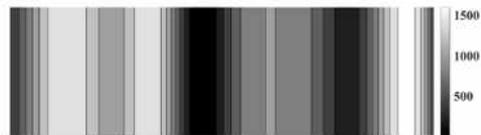
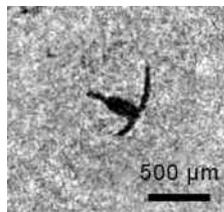
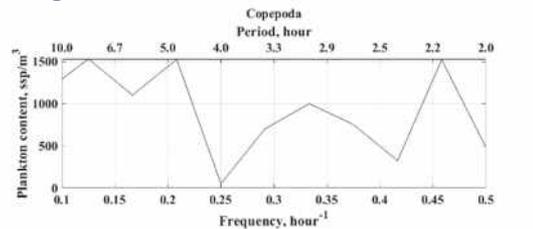
Линия циркадного ритма (период 24 час, вращение Земли (восход Солнца))

Линия приливного ритма (период 10,5 час, обращение Луны вокруг Земли)

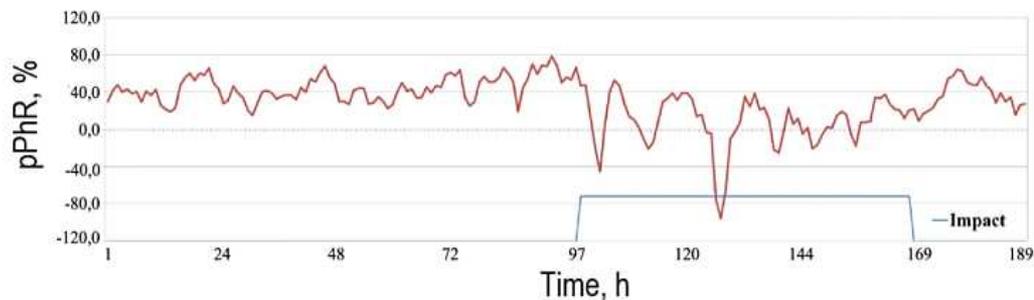
Линия сизигийного ритма (период 317 часов, взаимное расположение Луны и Солнца)

S-ритмика и изменение направления ветра

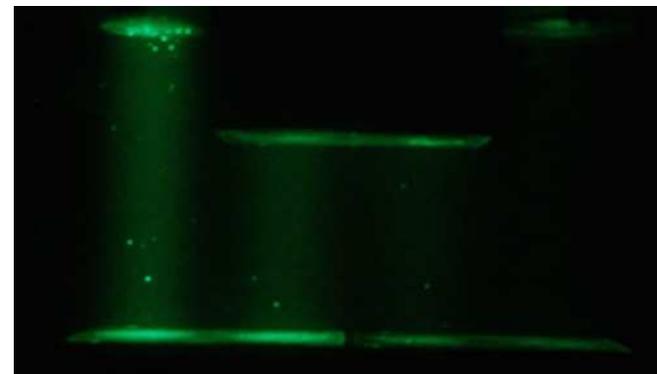
Отображение биоразнообразия в спектральном представлении



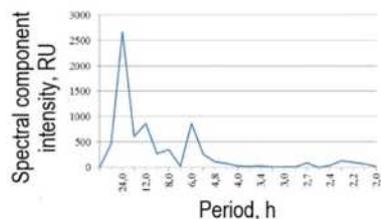
Исследование фототропного ответа на парную фотостимуляцию



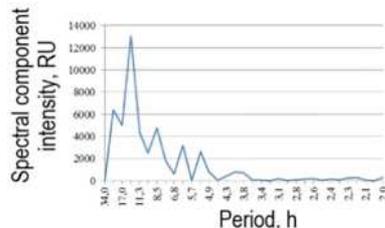
impact – период моделирования антропогенного воздействия, фрагмент временного ряда значений фототропного ответа на парную фотостимуляцию



Концентрация планктона в области аттракторного света



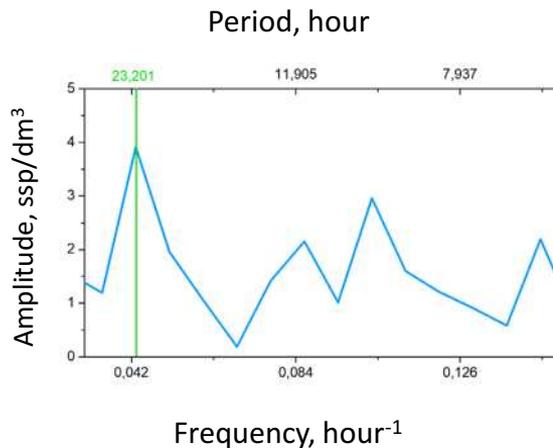
a



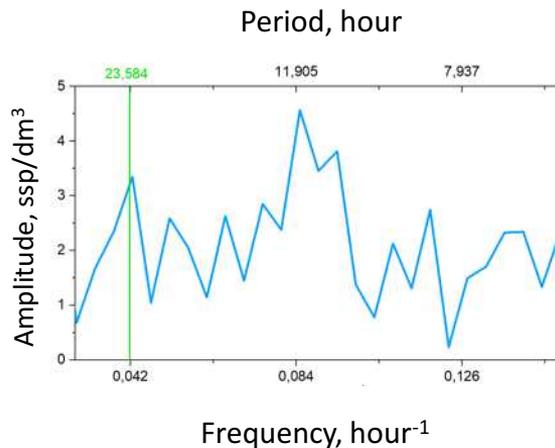
b

Спектрограммы ритмических процессов фототропного отклика без загрязнения (a), при моделировании антропогенного загрязнения (b)

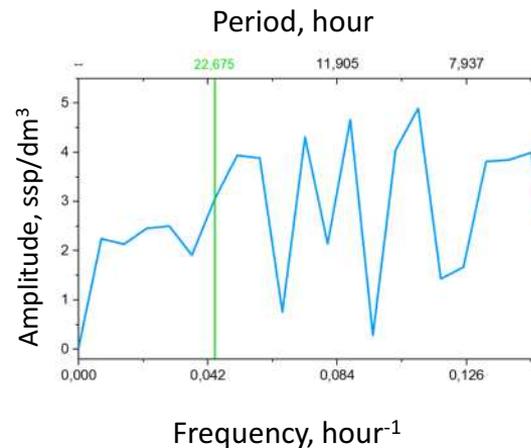
Изменение циркадного ритма во время стоянки



Спектр временного ряда
численности планктона
за 20.08.22–24.08.22



Спектр временного ряда
численности планктона
за 26.08.22–03.09.22



Спектр временного ряда
численности планктона
при добавлении индикаторной
примеси 04.09.22–14.09.22

Маркеры изменения экологической ситуации водоема, как это может работать

Маркер	Критерий опасности	Время реакции системы
Фототропная реакция уменьшилась вдвое	+	3 часа
+ Десинхронизация циркадного ритма	++	2 суток
+ Аномальная лазерно индуцированная флуоресценция	+++	1 сутки
+ Внутривидовое биоразнообразие уменьшилось вдвое	++++	1 квартал
+ Межвидовое разнообразие уменьшилось вдвое	Катастрофа	1 год

**Подводные обсерватории
для экологического
и климатического мониторинга
акватории**

Кабельная морская обсерватория NEPTUNE Canada



Представлены маршрут магистрального кабеля протяженностью 800 км, местоположение узлов и береговой станции в Порт-Альберни

Cabled Networks. URL: <https://www.oceannetworks.ca/observatories/physical-infrastructure/cabled-networks/>

Система наблюдений за океаном. Австралия



A Schematic of IMOS Nodes and Facilities

IMOS integrated marine observing system. URL:

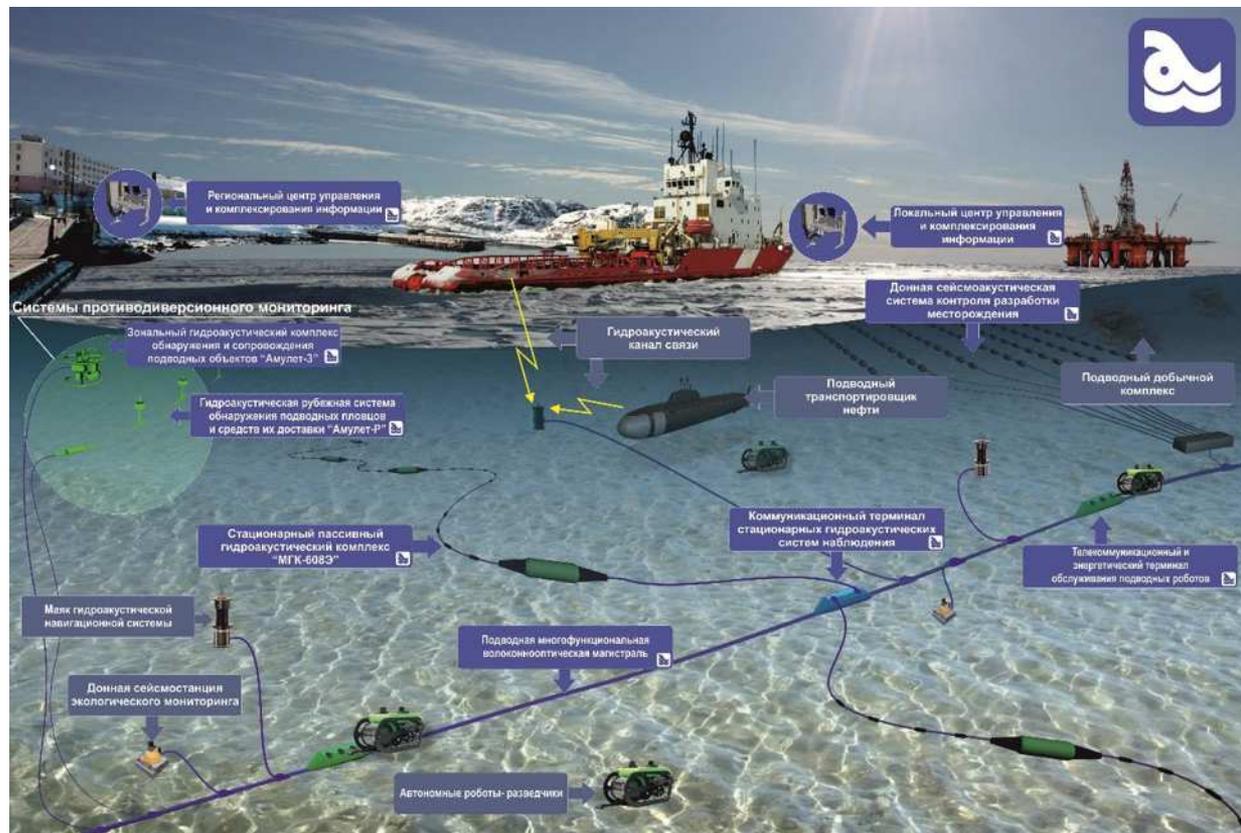
<https://web.archive.org/web/20090912171718/>

<http://imos.org.au/about.html>

В составе контролируемого подводного района (КПР) комплексное решение для освоения шельфовых зон арктического региона

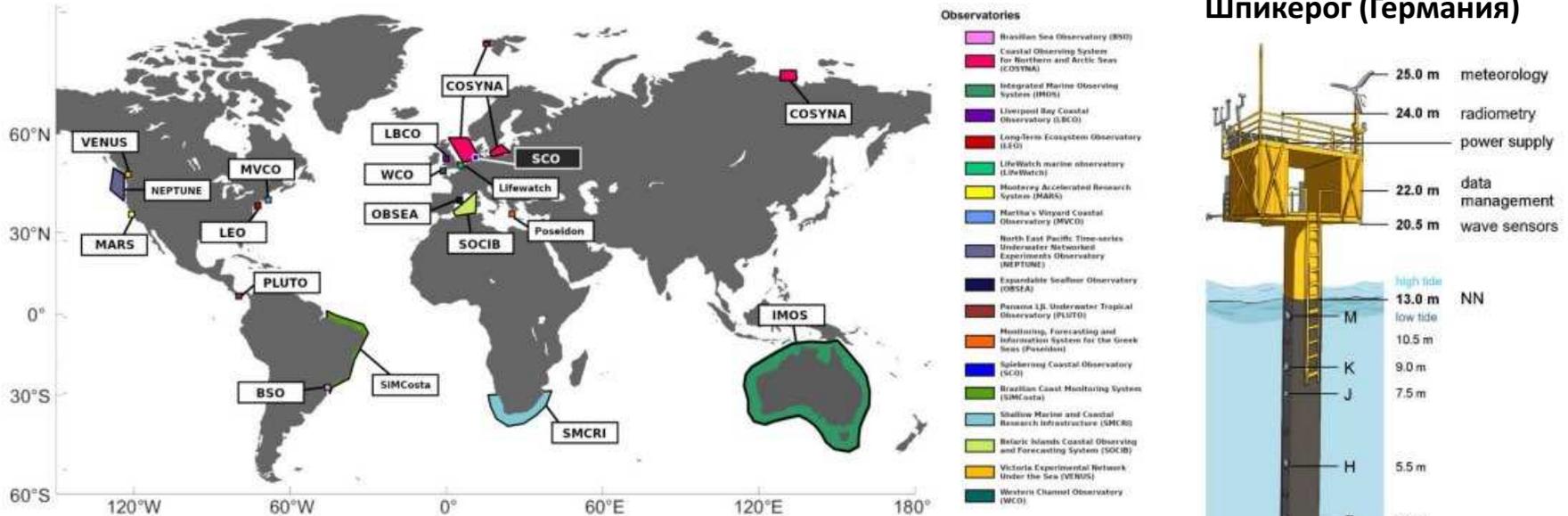
Научно-исследовательский институт «Атолл»

- Обнаружение подводных объектов в режиме активной вертикальной гидролокации на границе охраняемой зоны акватории
- Обнаружение, классификация и сопровождение подводных и надводных объектов в режиме шумопеленгования



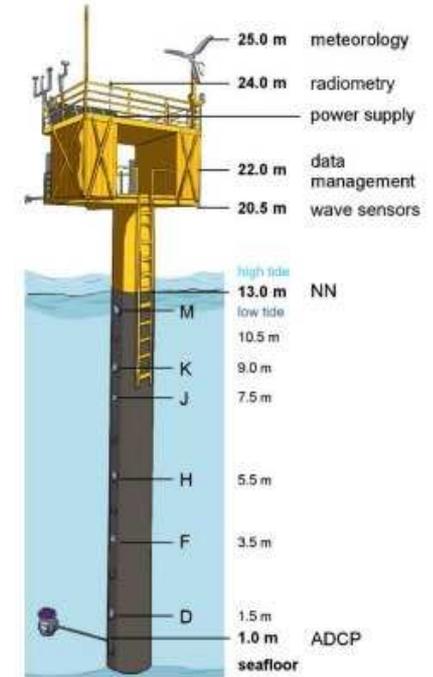
Стационарные подводные обсерватории

Обзор прибрежных обсерваторий

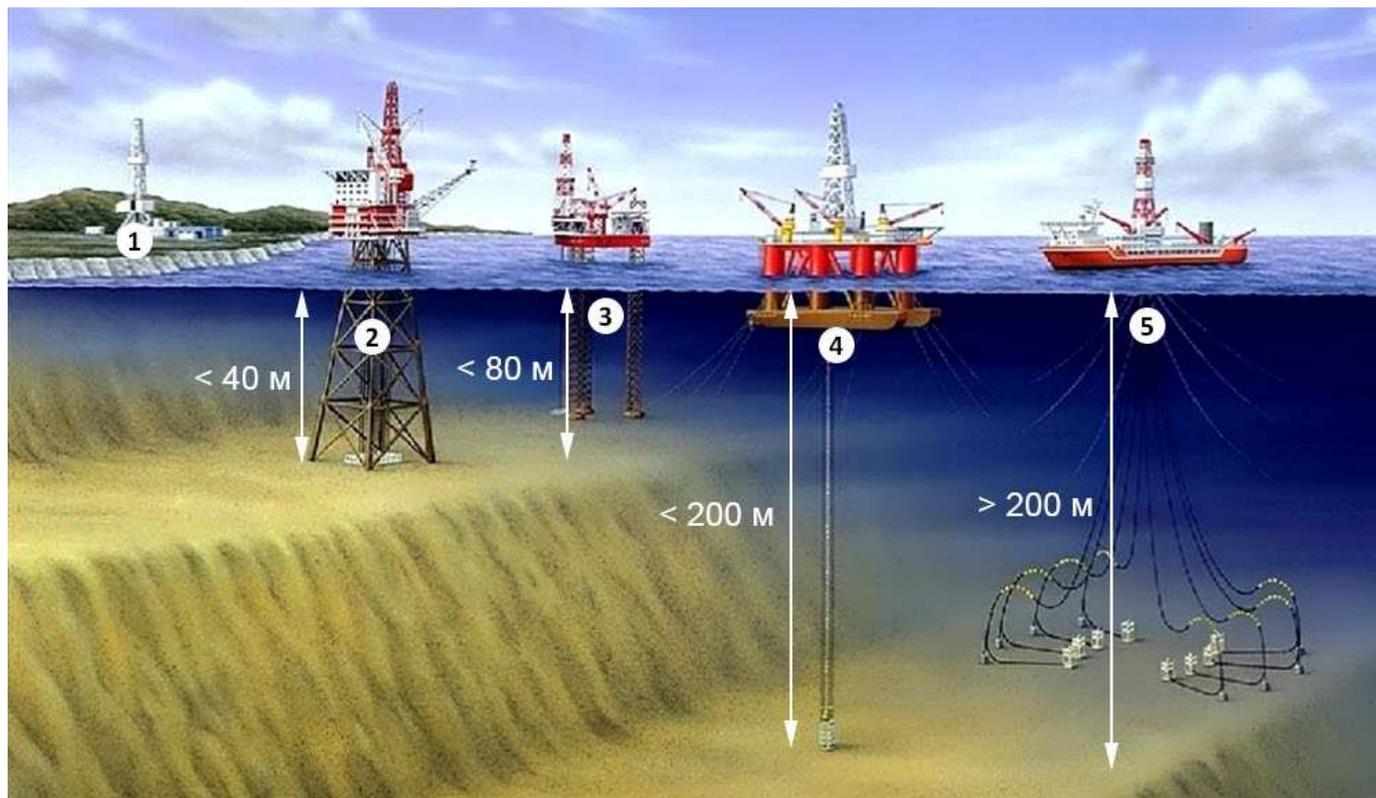


The Spiekeroog Coastal Observatory: A Scientific Infrastructure at the Land-Sea Transition Zone (Southern North Sea)
Oliver Zielinski, Daniela Pieck, Jan Schulz, et al. Front. Mar. Sci., 17 February 2022 Sec. Ocean Observation
DOI: 10.3389/fmars.2021.754905

Станция регистрации временных рядов Шпикерог (Германия)

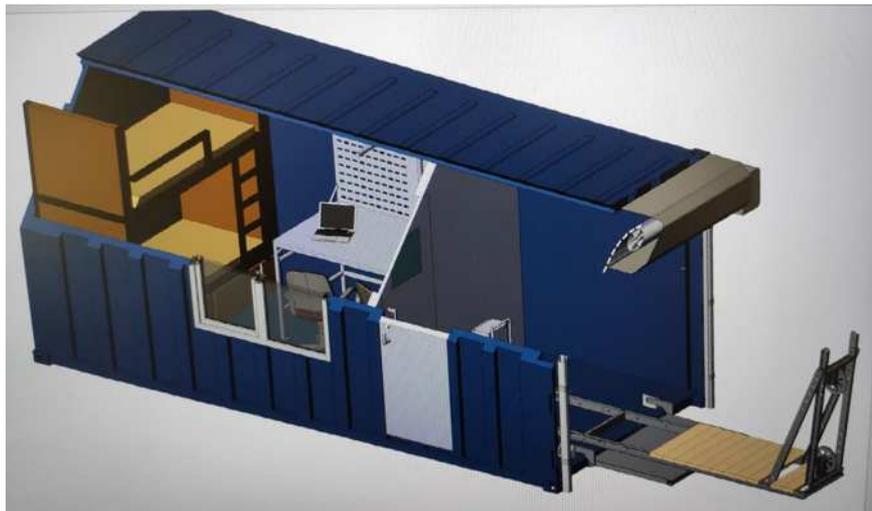


Создание подводной обсерватории для мониторинга климата и экологического состояния акваторий (Арктика, Камчатка, Сахалин...)



Буровая платформа
<http://knowledge.su/b/burovaya-platforma>

Вариант ДНС-станции для стационарного базирования на готовых платформах



- Анализ взвеси морских частиц при проведении дноуглубительных или погрузочно-разгрузочных работ в акватории порта (*причал*)
- Опытная эксплуатация поста биоиндикационного мониторинга поведенческой активности планктона в течение длительного времени (более трех - шести месяцев) на добывающей платформе (*платформа*)
- Анализ кормовой базы лосося (*причал*)
- Обнаружение эпизодического цветения цепей диатомовых водорослей (*причал*)
- Аналитика пузырькового газопереноса в системе донные отложения-водная толща-атмосфера (*причал, судно в дрейфе*)

Выводы

- ✓ Разработанный DHC-зонд и технология DHC позволяют проводить длительный мониторинг *in situ* параметров, характеризующих физиологическое состояние мезозопланктонного сообщества морских акваторий
- ✓ Это обеспечивает регистрацию временных рядов выбранных параметров как для естественного, так и для фотостимулированного состояния планктона
 - концентрация планктона в рабочем объеме DHC
 - фототропный отклик
 - внутривидовая энтропия
 - межвидовая энтропия

Выводы

- ✓ Последующая **спектральная обработка** полученных результатов мониторинга позволяет выделить **наиболее характерные частоты (ритмы) активности планктона**, особенности которых могут быть использованы для определения экологического благополучия экосистемы
- ✓ В работе приведен **пример изменения спектральных и мониторинговых характеристик** при локальном модельном антропогенном воздействии
- ✓ **Нарушение устойчивости ритмических процессов изменения концентрации планктона в рабочем объеме ДНС** может быть использовано в качестве маркера нарушения благополучия экосистемы

Выводы

- ✓ Дальнейшие исследования будут направлены на **изучение** этого и других **маркеров нарушения благополучия экосистемы** (тревожных сигналов), а также временных критериев их действия
- ✓ Целесообразно построение **распределенных систем мониторинга акваторий с размещением средств измерений вблизи опасных объектов** — атомные станции, нефтяные платформы, газопроводы, морские захоронения, промысловая деятельность, исследования сипов

Литература

- Dyomin V.V., Davydova A.Yu., Morgalev Yu.N, Olshukov A.S., Polovtsev I.G., Morgaleva T.G., Morgalev S.Yu. Planktonic Response to Light as a Pollution Indicator // *Journal of Great Lakes Research*. 2020. Vol. 46, Issue 1, P. 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.012>
- Dyomin V.V., Davydova A.Y., Morgalev S.Y., Kirillov N.N., Olshukov A.S., Polovtsev I.G. and Davydov S.A. Monitoring of Plankton Spatial and Temporal Characteristics With the Use of a Submersible Digital Holographic Camera // *Front. Mar. Sci.* 2020. Vol. 7, 653. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00653>
- Dyomin V.V., Davydova A.Y., Polovtsev I.G., Olshukov A.S., Kirillov N.S., Davydov S.A. Underwater Holographic Sensor for Plankton Studies In Situ including Accompanying Measurements // *Sensors*. 2021. Vol. 21, 4863. <https://doi.org/10.3390/s21144863>

Литература

- Dyomin V.V., Morgalev Y.N., Polovtsev I.G., Davydova A.Y., Morgalev S.Y., Kirillov N.S., Morgaleva T.G., & Olshukov A.S. Phototropic response features for different systematic groups of mesoplankton under adverse environmental conditions // *Ecology and Evolution*. 2021. Vol. 00, 1–12. <https://doi.org/10.1002/ece3.8072>
- Dyomin V.V., Semiletov I., Chernykh D., Chertoprud E., Davydova A., Kirillov N., Konovalova O., Olshukov A., Osadchiev A., Polovtsev I. Study of Marine Particles Using Submersible Digital Holographic Camera during the Arctic Expedition // *Appl. Sci.* 2022. Vol. 12, 11266. <https://doi.org/10.3390/app122111266>
- Dyomin V.V., Davydova A.Y., Kirillov N.S., Morgalev S.Y., Naumova E., Olshukov A.S., Polovtsev I.G. In Situ Measurements of Plankton Biorhythms Using Submersible Holographic Camera // *Sensors*. 2022. Vol. 22, I. 17, 6674. <https://doi.org/10.3390/s22176674>

Литература

- Morgalev Y.N., Dyomin V.V., Morgalev S.Y., Davydova A.Y., Morgaleva T.G., Kondratova O.V., Polovtsev I.G., Kirillov N.S., Olshukov A.S. Environmental Contamination with Micro- and Nanoplastics Changes the Phototaxis of Euryhaline Zooplankton to Paired Photostimulation // Water. 2022. Vol. 14, I. 23, 3918. <https://doi.org/10.3390/w14233918>
- Dyomin V., Morgalev Y., Morgalev S., Morgaleva T., Davydova A., Polovtsev I., Kirillov N., Olshukov A., Kondratova O. Features of phototropic response of zooplankton to paired photostimulation under adverse environmental conditions // Environ. Monit. Assess. 2023, 195, 503, <http://doi.org/10.1007/s10661-023-11102-2>
- Dyomin V., Morgalev Y., Morgalev S., Davydova A., Kondratova O., Morgaleva T., Polovtsev I. Phototactic Behavioral Responses of Mesozooplankton in the Barents Sea as an Indicator of Anthropogenic Impact // Water 2023, 15, 3901, <http://doi.org/10.3390/w15223901>
- Dyomin V., Davydova A., Kirillov N., Kondratova O., Morgalev Y., Morgalev S., Morgaleva T., Polovtsev I. Monitoring Bioindication of Plankton through the Analysis of Sensor Data. Sensors 2024, 24, 2370, <http://doi.org/10.3390/s24072370>



Благодарю за внимание!

Дёмин Виктор Валентинович

Первый проректор ТГУ,
заведующий лабораторией радиофизических
и оптических методов изучения окружающей среды

+7 903 914 3975

dyomin@tsu.ru