

УДК 574.65

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СООБЩЕСТВ ОБРАСТАНИЯ В УСЛОВИЯХ УСТАНОВКИ РЕГУЛИРУЕМОГО ПОТОКА ВОДЫ

© 2021 г. А. Ю. Звягинцев¹, С. И. Масленников¹, А. К. Цветников²,
А. А. Бегун¹, Н. И. Григорьева¹

¹Национальный научный центр морской биологии имени А. В. Жирмунского ДВО РАН,
Владивосток, Российская Федерация

²Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация
E-mail: ayzvyagin@gmail.com

Поступила в редакцию 16.03.2020; после доработки 29.07.2020;
принята к публикации 11.03.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.

Для испытания противокоррозионных и антиобрастающих защитных покрытий разработан наземный стенд — установка регулируемого потока воды. С учётом практической значимости проблемы актуальность проведённого исследования не вызывает сомнений. Стенд подключён к магистрали морской проточной воды. Устройство позволяет имитировать движение водного потока вокруг судна, тем самым моделирует условия движущегося плавающего средства. Цель настоящей работы — впервые представить созданную нами новую установку, на которую получено положительное решение Роспатента. Проведены натурные полевые испытания, продолжавшиеся два месяца. Они показали существенные качественные и количественные различия в составе сообществ обрастания на экспериментальных пластинах, помещённых в установку и подвешенных в толще воды в бухте Тихая Заводь (залив Восток) на пирсе МБС «Запад» Национального научного центра морской биологии ДВО РАН. В условиях установки регулируемого потока воды в сообществе перифитона доминируют бентосные диатомовые водоросли; зообрастание практически отсутствует. На пластинах из открытой бухты представлен обычный для переменной ватерлинии судов либо осушной зоны гидротехнических сооружений фитопланктон зелёных водорослей. Показана эффективность использования созданной нами установки для исследования закономерностей формирования сообществ обрастания в разных гидродинамических потоках. Основной практический вывод — то, что установку можно использовать для испытания и проверки свойств защитных покрытий на тестируемых субстратах, включая противообрастающие и антикоррозионные покрытия.

Ключевые слова: установка, регулируемый поток, сообщество обрастания, зелёные водоросли, диатомовые водоросли

Исследование формирования сообществ обрастания является одним из необходимых аспектов выявления закономерностей их функционирования. Подробное описание методов изучения перифитона экспериментальных пластин в мировой практике возможно лишь в большом аналитическом обзоре, составление которого не является целью данной работы. Важность анализа динамического аспекта сообществ обрастания действующих судов очевидна, поскольку проблема имеет высокую практическую значимость. Уже в середине XX века ежегодный ущерб от обрастания судов исчислялся миллионами долларов (*Marine Fouling and Its Prevention, 1952*); к настоящему моменту эти цифры только возрастают. Институтом биологии моря ДВО РАН разработана

методика исследования сукцессии сообществ обрастания действующих судов на плаву с использованием легководолазного снаряжения. Целям изучения динамических аспектов обрастания служила непосредственно поверхность корпуса судна. С применением этой методики уже получены значительные результаты (Звягинцев, 2005). В 1986 г. специалистами института совместно с сотрудниками ЦНИИ «Прометей» изготовлено судовое устройство для биологических и коррозионных испытаний (Остриков и др., 1998), предназначенное для экспозиции сменных пластин на корпусе судна во время его эксплуатации. Устройство успешно прошло испытание во время вьетнамского рейса НИС «Академик Александр Несмеянов» в 1986 г.

В мировой практике установки управляемого потока были многократно использованы для решения задач марикультуры, а также для иных целей (Fitzsimmons, 2000 ; Patent no. US8245440B2, 2012 ; Pearce et al., 2002 и др.). Цель настоящей работы — впервые представить созданную нами новую установку, на которую уже получено положительное решение Роспатента (Патент № 2728490, 2019). Поставлены следующие задачи: дать иллюстрированное описание установки регулируемого потока воды (далее — УРПВ); описать гидрологические условия испытаний как в установке, так и в открытой части залива; привести показания средних скоростей потока для каждой градации мощности двигателя УРПВ; провести сравнительный анализ структуры сообществ обрастания в установке и в условиях открытой бухты; обосновать эффективность использования созданной нами УРПВ для выявления закономерностей формирования сообществ обрастания в разных гидродинамических потоках; предоставить практические выводы и рекомендации по использованию установки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

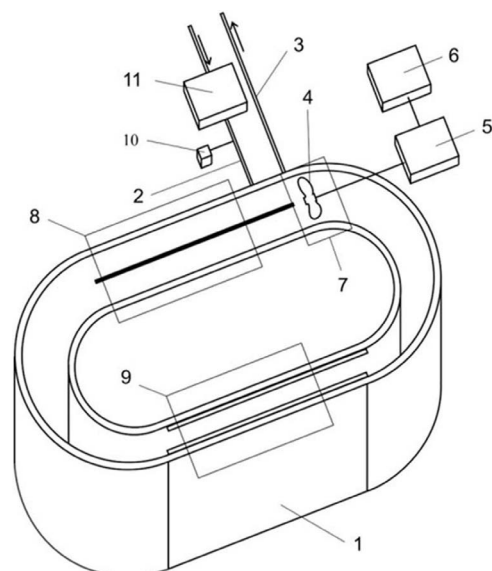
Конструкция установки регулируемого потока воды. Нами разработаны способ испытания свойств защитных покрытий в потоке морской воды и установка для его моделирования (рис. 1).

Рис. 1. Установка регулируемого потока воды:

- 1 — о-образная ёмкость переменного сечения;
- 2 — подающий водопровод;
- 3 — дренажная труба водосброса;
- 4 — маршевый гребной винт;
- 5 — силовая установка электродвигателя;
- 6 — блок управления включением-выключением электродвигателя с блоком управления оборотами двигателя;
- 7 — зона винто-рулевой группы;
- 8 — имитация поверхностей винто-рулевой группы;
- 9 — мидель и разные места носовой части, в т. ч. бульба;
- 10 — солемер-термометр непрерывного действия;
- 11 — водовод морской проточной воды с заданными параметрами очистки и обработки либо без очистки

Fig. 1. Device of controlled water flow:

- 1 – o-shaped container of variable cross-section;
- 2 – water supply pipe;
- 3 – spillway drain pipe;
- 4 – main screw propeller;
- 5 – electric motor power plant;
- 6 – electric motor on-off control unit with electric motor speed control unit;
- 7 – screw-steering group zone;
- 8 – imitation of screw-steering group surfaces;
- 9 – midship and different foreship areas, *inter alia* bulbous bow;
- 10 – continuous salinometer and thermometer;
- 11 – seawater conduit with specified parameters of purification and treatment or without purification



Совместно со специалистами Института химии ДВО РАН подготовлены конструкторские предложения и эскизная проработка круглогодичного морского стенда для испытания особенностей формирования обрастания на пластинах с различными составами покрытий, адгезии морских организмов на поверхности при разных скоростях потока воды и влияния покрытий на возникновение турбулентных потоков. Установка регулируемого потока (стенд) представляет собой комплекс технических устройств для моделирования потока морской воды с максимально возможным набором факторов, включая биотическую и абиотическую компоненту. УРПВ можно использовать для испытания и проверки свойств защитных покрытий на тестируемых субстратах, в том числе противообрастающих и антикоррозионных покрытий. Кроме того, она позволяет проводить эксперименты по влиянию скорости потока и его длительности как на процессы прикрепления и развития отдельных гидробионтов, так и на особенности формирования и функционирования сообщества обрастания. Установку можно применять для нагрузочных испытаний устройств и механизмов в потоке морской воды постоянной и переменной силы, при моделировании приливно-отливных, ветровых и постоянных течений, а также штормовой нагрузки. Проведена успешная апробация работы УРПВ на экспериментальных пластинах; получены предварительные результаты.

Разработанная нами УРПВ (Патент № 2728490, 2019) состоит из: подводного водозабора с насосной станции (центробежный насос, $12,5 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$, 900 Вт); водопровода морской проточной воды с заданными параметрами очистки и обработки либо без очистки; дренажной трубы водосброса; блока управления включением-выключением электродвигателя; блока управления оборотами двигателя и клапанами подачи-отвода морской воды; о-образной ёмкости переменного сечения для моделирования участков с разной скоростью течения воды; маршевого гребного винта; имитаторов рулевой колонки и борта морского судна из заданного материала с любым защитным покрытием либо протектором (см. рис. 1). Установка позволяет одновременно моделировать все условия движущегося судна с имитацией поверхностей винто-рулевой группы, миделя и носовой части (бульбы).

Гидрологические условия испытаний. Исследования проводили в бухте Тихая Заводь залива Восток (залив Петра Великого, Японское море). Характеристики морской воды определяли с помощью системы SeaGuard RCM (Aanderaa). Прибор устанавливали у пирса восточного мыса бухты Тихая Заводь на глубинах 1,0–1,5 м. Среднегодовые значения температуры и солёности воды приведены для средней части залива Восток, сезонные и суточные — для бухты Тихая Заводь. Изменения высоты приливов даны для г. Владивосток.

Этот район залива характеризуется значительными термогалинными колебаниями в поверхностном и придонном слое вод, особенно в дождливые годы. В бухте Восток с июня по сентябрь температура воды в слое 0–6 м варьирует от $+7,4$ до $+25,9$ °С (Григорьева и Кашенко, 2010). У поверхности солёность имеет очень широкий диапазон изменчивости (0,5–34,0 ‰); у дна — несколько меньше (19,2–35,2 ‰). Здесь в течение двух-трёх летних месяцев отмечены продолжительные периоды опреснения, как и в других мелководных районах залива Петра Великого.

Режим течений залива Восток определяется ветровыми, дрейфовыми и приливно-отливными течениями. Кроме того, выражено влияние Приморского течения, проявляющееся в устойчивости квазистационарных потоков в данной акватории. В заливе Петра Великого зарегистрированы неправильные полусуточные приливы с максимальными колебаниями 40–50 см (Состояние и устойчивость экосистем..., 2001). Литературные материалы о постоянных течениях в заливе Восток довольно противоречивы (Иващенко, 1993; Христофорова и др., 2004). Согласно одним данным, основной перенос вод осуществляется с запада на восток и имеет антициклональный характер, по другим — циклонический. По нашим архивным материалам, в бухте Тихая Заводь движение вод имеет преимущественно циклоническую направленность. Скорость течений здесь изменяется в пределах $2\text{--}18 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, возрастая к выходу из бухты до $6\text{--}26 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$.

В период проведения экспериментов нами осуществлены три серии измерений скоростей создаваемого потока в установке 11 и 22 октября 2019 г. Все измерения выполняли как вблизи выходного отверстия, так и на удалении на 1,0–1,5 м. В отдельных сериях определены скорости потока на основной (VIII) мощности. Также проведены измерения с погружением только верхней части прибора, где расположен датчик.

По четыре стальные пластины прямоугольной формы 20×20 см одновременно были установлены вертикально на буге в бухте Тихая Заводь на глубине 1 м и на УРПВ. Срок их экспозиции — два месяца (с начала сентября по конец октября 2019 г.). На каждой из пластин отбирали пробы макрообрастания на площади 10×10 см в трёх повторностях. Всего собрано и обработано 24 количественных пробы. Разборку проб макрообрастания проводили согласно общепринятой методике обработки бентосных проб в лабораторных условиях (Жадин, 1969). При камеральной обработке свежего живого материала сначала выделяли и подсчитывали все компоненты зоо- и фитоперифитона, затем разделяли их на отдельные группы. По окончании разборки проб макрофиты закладывали в гербарий либо фиксировали 4%-ным формалином, зоообрастание — 70%-ным спиртом; затем их передавали специалистам для определения. Таксономическая принадлежность обрастателей установлена сотрудниками Национального научного центра морской биологии ДВО РАН (ННЦМБ ДВО РАН). Животных, определённых до вида или более высокого таксономического ранга, подсчитывали и взвешивали с точностью до 0,01 г после обсушивания на фильтровальной бумаге. Животных, строящих убежища (сидячие полихеты в трубках, разноногие раки в домиках), взвешивали вместе с этими образованиями, являющимися продуктами их жизнедеятельности. По окончании определения систематических групп составляли списки видов с указанием количественных показателей каждого вида и его местонахождения.

Камеральную и микроскопическую обработку микроперифитона экспериментальных пластин проводили по общепринятым методикам (Рябушко, 2013 ; Рябушко и Бегун, 2015) в лаборатории морской микробиоты ННЦМБ ДВО РАН. Количественное обилие микроводорослей оценивали по шкале Вислоуха. Идентификация видового состава выполнена на временных водных препаратах под световым микроскопом Olympus BX41 с помощью объектива UPLanFl 100×/1.30 (Япония) и масляной иммерсии (Guiry & Guiry, 2020).

Статистическая обработка материала. Группирование проб выполняли посредством кластерного анализа методом Варда (ward.D2) на основе метрики Брея — Кёртиса и последующего применения процедуры бутстрепинга для оценки вероятности появления узла на дендрограмме (Шитиков и Розенберг, 2013). Несмещённые бутстреп-вероятности оценивали путём подбора параметрических моделей с использованием метода максимального правдоподобия. Для проверки достоверности появления фрагментов древовидной структуры применяли процедуру ANOSIM с вычислением общей статистики (global R, GR). Для выделенных групп определяли вклады видов во внутригрупповое сходство и межгрупповое несходство (процедура SIMPER). Попарное сравнение различных количественных характеристик обрастания (среднее число видов в пробе; биомасса; индексы видового богатства Маргалёфа, выровненности Пиелу и видового разнообразия Шеннона — Винера) производили при помощи теста Манна — Уитни [непараметрический аналог *t*-критерия Стьюдента (нулевая гипотеза H_0 : относительный сдвиг распределений отсутствует)].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрологические наблюдения в районе испытаний установки. По данным суточной съёмки в октябре 2019 г., в районе восточного мыса бухты Тихая Заводь у поверхности воды скорости течений варьировали от 0,02 до 9,7 см·с⁻¹, в среднем составляя 1,1 см·с⁻¹; в отлив

течения имели северное и северо-восточное направление, в прилив — юго-восточное, южное и юго-западное (рис. 2). Изменились и параметры температуры и солёности воды: температура понизилась в ночное время на $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$; солёность с приливом возросла на $1,5\text{ }‰$.

Показания средних скоростей потока для каждой градации мощности приведены на рис. 3. Серии измерений 11 октября показали хорошую сходимость результатов; 22 октября отмечена некоторая нестабильность потока на VI, VIII и X режимах. Минимальные средние значения скоростей составляли $2,6\text{--}2,7\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$, максимальные — $55,1\text{--}65,0\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. При проведении серий измерений с переменным переключением режимов скорость в VIII режиме варьировала в пределах $21,0\text{--}32,7\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$, в среднем составляя $24,5$, $22,0$ и $29,0\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ (значения соответствуют номерам серий опытов). При отдельной длительной экспозиции средняя скорость основного режима (VIII) составила $51,7\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Следует отметить занижение скоростей самим корпусом прибора. Чтобы исключить данные помех, измерения были проведены с погружением только верхней части прибора. При этом средняя скорость потока на удалении $1,0\text{--}1,5\text{ м}$ составила $78,8\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$, а вблизи выхода — $84,3\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Максимальное зафиксированное значение — $91,2\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$.

Также в период проведения экспериментов по изучению формирования обрастаний в течение трёх месяцев (сентябрь — ноябрь) при заборе воды ежечасно замеряли температуру и солёность воды, поступающей в установку (рис. 4). Температура закономерно снизилась с $+22,0$ до $+1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (шло постепенное её охлаждение). В первой половине сентября солёность претерпевала из-за дождей существенные колебания ($26,2\text{--}33,7\text{ }‰$); затем общий фон выравнивался, значения изменялись в диапазоне $31,2\text{--}34,1\text{ }‰$.

Сравнительный анализ сообществ обрастания экспериментальных пластин в условиях установки регулируемого потока воды и открытой бухты Тихая Заводь. В ходе проведения эксперимента на пластинах из разных мест экспозиции всего зарегистрировано 12 видов гидробионтов, из которых 2 — зелёные водоросли (табл. 1). Из прикреплённых

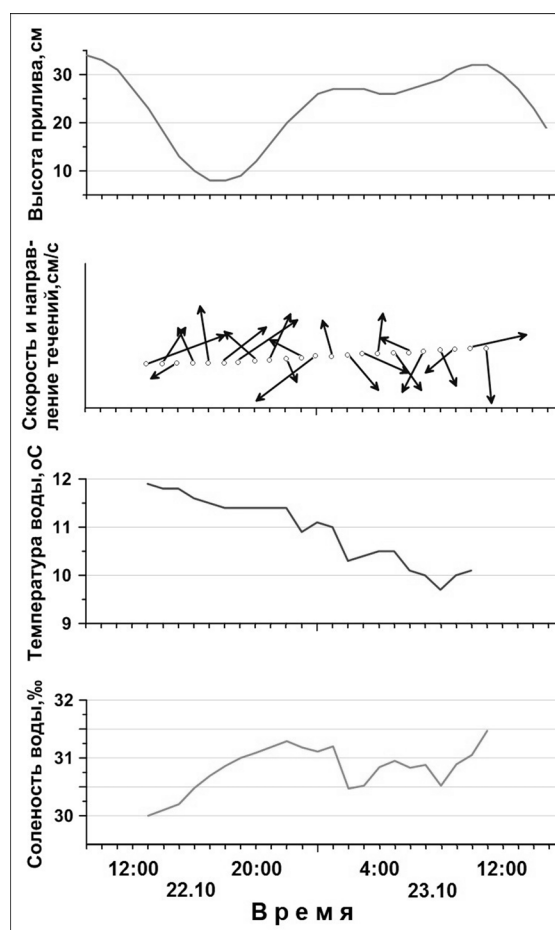


Рис. 2. Суточные изменения параметров высоты прилива (см), скорости ($\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$) и направления течений (градусы), температуры ($^{\circ}\text{C}$) и солёности воды ($‰$) у восточного мыса бухты Тихая Заводь 22–23 октября 2019 г.

Fig. 2. Daily variations of indicators in tide rise (cm), velocity ($\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$) and direction of currents (degrees), temperature ($^{\circ}\text{C}$), and water salinity ($‰$) near the eastern cape of the Tikhaya Zavod Bay on 22–23 October, 2019

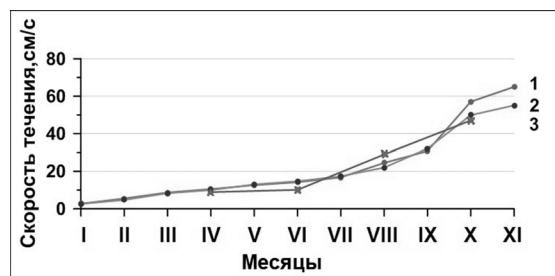


Рис. 3. Изменения скоростей потока в зависимости от выставленной мощности. 1, 2 — серии замеров 11.10.2019; 3 — серия замеров 22.10.2019

Fig. 3. Changes in flow velocities depending on the set power. 1, 2 – series of the measurements on 11.10.2019; 3 – series of the measurements on 22.10.2019

форм зоообрастания отмечены усонogie раки *Amphibalanus improvisus* (Darwin, 1854), а также многощетинковые черви *Hydroides ezoensis* Okuda, 1934 и *Neodexiospira alveolata* (Zachs, 1933). Кроме развития макроводорослей, в обрастании пластин из обоих исследованных биотопов зафиксировано массовое развитие диатомовых водорослей; всего определено 16 видов Bacillariophyta (см. табл. 5, 6).

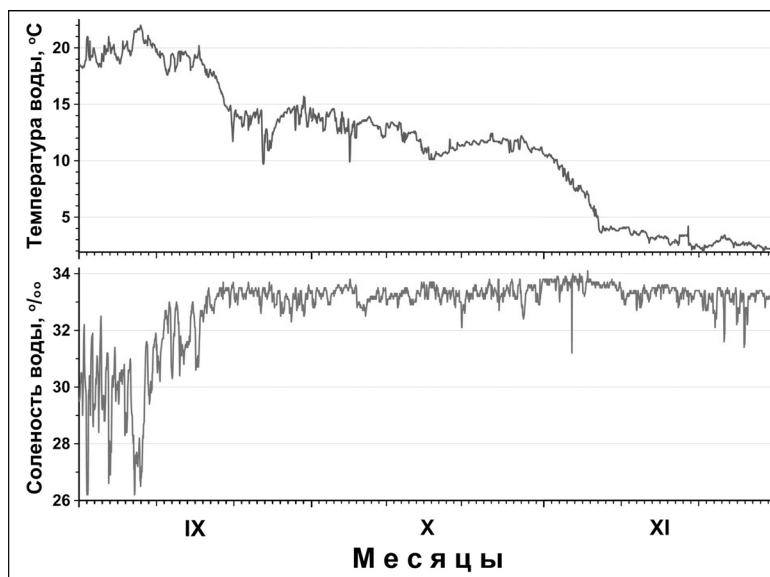


Рис. 4. Колебания температуры (°C) и солёности (‰) воды, поступающей при водозаборе в установку в сентябре — ноябре

Fig. 4. Fluctuations of temperature (°C) and salinity (‰) of water, entering the device on September – November

Таблица 1. Таксономический состав макрообрастания пластин из установки регулируемого потока воды и в условиях открытой бухты Тихая Заводь

Table 1. Taxonomic composition of macrofouling on the plates from the device of controlled water flow and under the conditions of open Tikhaya Zavod Bay

| | Установка регулируемого потока воды | Открытая бухта Тихая Заводь |
|---|-------------------------------------|-----------------------------|
| Algae | | |
| <i>Ulva linza</i> Linnaeus, 1753 | + | + |
| <i>Ulva fenestrata</i> Postels & Ruprecht, 1840 | + | + |
| Animalia | | |
| <i>Hydroides ezoensis</i> Okuda, 1934 | – | + |
| <i>Neodexiospira alveolata</i> (Zachs, 1933) | – | + |
| <i>Amphibalanus improvisus</i> (Darwin, 1854) | – | + |
| <i>Caprella cristibrachium</i> Mayer, 1903 | – | + |
| <i>Caprella acanthogaster</i> Mayer, 1890 | – | + |
| <i>Caprella algaceus</i> Vassilenko, 1967 | – | + |
| <i>Ampithoe lacertosa</i> Spence Bate, 1858 | – | + |
| <i>Pontogeneia intermedia</i> (?) Gurjanova, 1938 | – | + |
| <i>Monocorophium acherusicum</i> (Costa, 1853) | – | + |
| <i>Lacuna turrita</i> A. Adams, 1861 | – | + |

К фонообразующим видам макрообрастания мы отнесли зелёные водоросли *Ulva linza* Linnaeus, 1753 и *Ulva fenestrata* Postels & Ruprecht, 1840, а также усконогих раков *Amphibalanus improvisus*. Таксономический состав и количественное распределение сообществ обрастания с УРПВ и в условиях открытой бухты Тихая Заводь существенно различаются (см. рис. 5, 6). Так, на пластинах из установки доминируют, составляя основу биомассы, диатомеи; на пластинах из открытой бухты — зелёные водоросли *U. linza*. Подвижные формы, представленные брюхоногими моллюсками и разноногими раками, дают минимальную биомассу или встречаются только в качественных пробах.

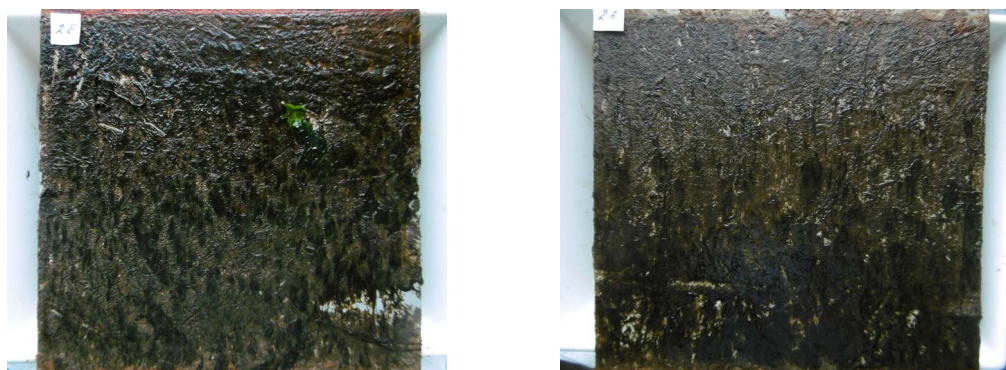


Рис. 5. Общий вид обрастания на пластинах из установки регулируемого потока воды. Таксоцен диатомовых водорослей в форме макроколоний

Fig. 5. View of fouling on the plates from the device of controlled water flow. Diatom taxocen in the form of macrocolonies



Рис. 6. Общий вид сообщества обрастания на пластинах из открытой бухты Тихая Заводь. Сообщество *Ulva linza* + *Amphibalanus improvisus*

Fig. 6. View of fouling on the plates from the open Tikhaya Zavod Bay. *Ulva linza* + *Amphibalanus improvisus* community

Результаты статистического анализа. Проанализированная выборка отчётливо разделяется на две группы с весьма высоким внутригрупповым сходством — 91,2 и 94,7 %, при межгрупповом несходстве 70,8 % (рис. 7, табл. 2): Группа I — пробы с пластин, экспонированных в бухте Тихая Заводь (Z1–Z12); группа II — пробы с УРПВ (U1–U12). Основной вклад в сходство проб группы I вносит *Ulva linza* (52,8 %); у следующего за ним *Amphibalanus improvisus* вклад в 2,7 раза меньше (19,4 %). В группе II основной вклад вносит комплекс диатомей (66,9 %); вклад *U. linza* вдвое меньше (32,9 %). Эти же организмы определяют и несходство группировок: вклад диатомей составляет 31,1 %; *U. linza* — 26,8 %; *A. improvisus* — 16,2 %. Выделение этих групп является значимым с позиций статистики, о чём свидетельствуют результаты процедуры ANOSIM ($GR(1,000 \pm 0,120)$; $\pm 95\%$ — квантиль перестановок; $p = 0,001$; число перестановок — 999).

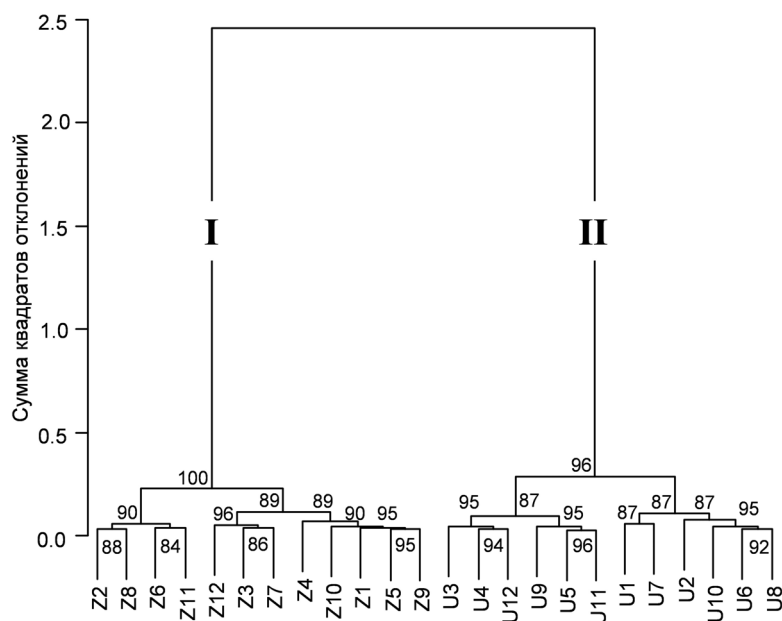


Рис. 7. Дендрограмма сходства пластин, полученная методом Варда (ward.D2) с использованием коэффициента сходства Брея — Кёртиса (преобразование — корень четвёртой степени) на основе биомасс фито- и зоообращаний. В узлах дендрограммы приведены наилучшие оценки несмещённых бутстреп-вероятностей (число перестановок — 1000). Римские цифры — выделяемые группировки

Fig. 7. Dendrogram of the plates similarity (ward.D2 method) with Bray – Curtis similarity index (the fourth-root transformation) based on phyto- and zoofouling biomasses. The best estimations of unbiased bootstrap probabilities are shown in dendrogram nodes (number of permutations is 1000). Roman numerals denote allocated groups

Таблица 2. Разложение среднего внутригруппового сходства (несходства) по вкладам отдельных видов обрастателей для пластин, экспонированных на установке регулируемого потока воды и в условиях открытой бухты Тихая Заводь

Table 2. Distribution of average similarity (dissimilarity) within (between) groups based on contribution of each fouling species on the plates from the device of controlled water flow and from the open Tikhaya Zavod Bay

| Таксон | I/II | $\bar{\delta}_i$ | $\bar{\delta}_i / SD(\delta_i)$ | CN, % | CCN, % |
|--|-----------|------------------|---------------------------------|-------|--------|
| <i>Группа I.</i> Среднее сходство: 91,2 | | | | | |
| <i>Ulva linza</i> | 5148 | 48,14 | 21,38 | 52,82 | 52,82 |
| <i>Amphibalanus improvisus</i> | 99,7 | 17,70 | 22,25 | 19,42 | 72,23 |
| <i>Hydrooides ezoensis</i> | 16,3 | 10,48 | 8,90 | 11,49 | 83,72 |
| <i>Neodexiospira alveolata</i> | 7,8 | 9,20 | 13,62 | 10,09 | 93,82 |
| <i>Группа II.</i> Среднее сходство: 94,7 | | | | | |
| Bacillariophyta | 1983 | 63,30 | 19,85 | 66,86 | 66,86 |
| <i>Ulva linza</i> | 115 | 31,13 | 16,88 | 32,88 | 99,74 |
| <i>Группы I–II.</i> Среднее несходство: 70,8 | | | | | |
| Bacillariophyta | 0,15/1983 | 21,99 | 20,56 | 31,08 | 31,08 |
| <i>Ulva linza</i> | 5148/115 | 18,93 | 12,67 | 26,75 | 57,84 |
| <i>Amphibalanus improvisus</i> | 99,7/0,0 | 11,47 | 16,39 | 16,21 | 74,04 |
| <i>Hydrooides ezoensis</i> | 16,3/0,0 | 7,14 | 7,35 | 10,10 | 84,14 |
| <i>Neodexiospira alveolata</i> | 7,83/0,0 | 6,05 | 10,32 | 8,55 | 92,69 |

Примечание: виды расположены в порядке уменьшения процентных вкладов; δ_i — мера сходства (несходства); SD — стандартное отклонение; CN — процентный вклад; CCN — накопленные проценты.

Note: species are arranged in decreasing order of percent contribution; δ_i — measure of similarity (dissimilarity); SD — standard deviation; CN — percent contribution; CCN — accumulated percent.

Ассоциации обрастания пластин, экспонированных в бухте Тихая Заводь и на УРПВ, статистически значимо отличаются по всем количественным показателям (табл. 3). При этом первая ассоциация характеризуется большими показателями средней биомассы, числа видов в пробе и величины индекса Маргалефа, а вторая — более высокими значениями индексов Пиелу и Шеннона — Винера. Последний упомянутый факт говорит о том, что вторая группировка обладает большей выровненностью распределений видов по рангам и видовым разнообразием с позиций теории информации; это является «артефактом» и объясняется гораздо меньшим числом поселившихся организмов и более низкой биомассой вида-доминанта (в данном случае — комплекса диатомовых водорослей). Следует подчеркнуть, что абсолютные значения всех экологических индексов, включая среднее число видов, крайне низки по сравнению с таковыми как большинства природных сообществ, так и ассоциаций обрастания с большей продолжительностью развития.

Таблица 3. Количественные характеристики сообщества обрастания пластин, экспонированных на установке регулируемого потока воды и в условиях открытой бухты Тихая Заводь, и результаты попарного сравнения параметров (тест Манна — Уитни; приведена вероятность справедливости H_0)

Table 3. Quantitative characteristics of fouling communities on the plates from the device of controlled water flow and from the open Tikhaya Zavod Bay and results of pairwise comparison of indicators (Mann – Whitney test; probability of H_0 validity is shown)

| Группировка | $S \pm SE$ | $B \pm SE, \text{г}\cdot\text{м}^{-2}$ | $R \pm SE$ | $e \pm SE$ | $H' \pm SE, \text{бит}\cdot\text{г}^{-1}$ |
|----------------------|---------------|--|-----------------|-------------------|---|
| I. <i>Ulva linza</i> | $6,4 \pm 0,3$ | 5277 ± 209 | $0,63 \pm 0,03$ | $0,073 \pm 0,004$ | $0,19 \pm 0,01$ |
| II. Diatomea | $2,2 \pm 0,1$ | 2101 ± 108 | $0,15 \pm 0,01$ | $0,299 \pm 0,019$ | $0,32 \pm 0,02$ |
| Тест Манна — Уитни | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

Примечание: S — среднее число видов в пробе; B — биомасса; R — индекс Маргалефа; e — индекс выровненности Пиелу; H' — индекс видового разнообразия Шеннона — Винера; SE — ошибка репрезентативности.

Note: S – average species number in the sample; B – biomass; R – Margalef index; e – Pielou evenness index; H' – Shannon – Wiener diversity index; SE – standard error.

У выделенных ассоциаций всего три общих компонента — комплекс диатомей, *U. linza* и *U. fenestrata*. Первые два найдены во всех пробах; третий встречался с частотой 50,0 и 17 % в первой и второй группировках соответственно. Средняя биомасса микроводорослей на пластине, экспонированной на УРПВ, была в тысячи раз выше, чем в природных условиях, а таковая макрофитов *U. linza* — наоборот, почти в 45 раз ниже. Естественно, такие различия значимы с позиций статистики (результаты теста Манна — Уитни: вероятность справедливости H_0 $p = 0,000$) (рис. 8, табл. 4). Отметим, что биомасса *U. fenestrata* в двух случаях была примерно одинаковой ($p = 0,260$). Другое отличие, качественное, заключается в полном отсутствии макрозообентоса на пластине из УРПВ, тогда как в естественных условиях на пластине найдено 10 видов таких организмов, причём *A. improvisus* можно рассматривать как субдоминантный вид (с учётом 100%-ной встречаемости и большой биомассы).

Таким образом, статистический анализ доказывает кардинальные (качественные и количественные) различия ассоциаций обрастания пластин, экспонированных в бухте Тихая Заводь и на УРПВ. Следует отметить, что эти различия, по сути, носят сукцессионный характер. Известно, что на предметах, попавших в море, на первых фазах сукцессии поселяются бактерии и микроводоросли, которые совместно образуют слизистую плёнку, способствующую последующему заселению субстрата различными гидробионтами (Звягинцев, 2005). Наш эксперимент отчётливо показывает «задержку» сукцессии в условиях УРПВ.

Диатомовые водоросли микроперифитона экспериментальных пластин. На поверхности экспериментальных пластин в условиях УРПВ отмечено наличие микроперифитона тёмно-коричневого цвета, с доминированием макроколоний диатомовых водорослей, составляющих основу биомассы обрастания. В сообществе микроперифитона идентифицировано

14 видов, представленных различными жизненными формами: подвижными и неподвижными, прикрепленными и свободноживущими, одиночными и колониальными (табл. 5). По отношению к солёности воды по числу видов преобладали морские (7 видов) и солоноватоводно-морские формы, по отношению к активной реакции среды — алкалифилы (Fitzsimmons, 2000). В фитогеографическом аспекте доминировали широко распространённые виды-космополиты (Рябушко и Бегун, 2015).

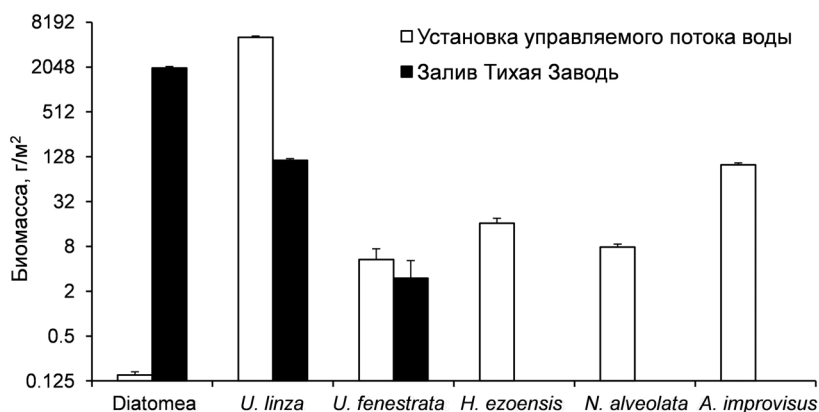


Рис. 8. Биомасса некоторых обрастателей пластин, экспонированных на установке регулируемого потока воды и в условиях открытой бухты Тихая Заводь (логарифмический масштаб). Планки погрешности — ошибка репрезентативности

Fig. 8. Biomass of some foulers on the plates from the device of controlled water flow and from the open Tikhaya Zavod Bay (logarithmic scale). Error bars denote standard error

Таблица 4. Таксономический состав и биомасса (\pm ошибка репрезентативности) сообществ обрастания пластин, экспонированных на установке регулируемого потока воды и в условиях открытой бухты Тихая Заводь

Table 4. Taxonomic composition and biomass (\pm standard error) of fouling communities on the plates from the device of controlled water flow and from the open Tikhaya Zavod Bay

| Таксон | Установка регулируемого потока воды | Открытая бухта Тихая Заводь |
|---|-------------------------------------|-----------------------------|
| Microalgae | | |
| Bacillariophyta | 1983 \pm 107 | 0,15 \pm 0,02 |
| Algae | | |
| <i>Ulva linza</i> Linnaeus, 1753 | 115 \pm 6 | 5148 \pm 210 |
| <i>Ulva fenestrata</i> Postels & Ruprecht, 1840 | 3,0 \pm 2,1 | 5,3 \pm 2,1 |
| Animalia | | |
| <i>Hydroides ezoensis</i> Okuda, 1934 | – | 16,3 \pm 2,7 |
| <i>Neodexiospira alveolata</i> (Zachs, 1933) | – | 7,8 \pm 0,8 |
| <i>Amphibalanus improvisus</i> (Darwin, 1854) | – | 100 \pm 6 |
| <i>Caprella cristibrachium</i> Mayer, 1903 | – | 0,03 \pm 0,01 |
| <i>Caprella acanthogaster</i> Mayer, 1890 | – | 0,02 \pm 0,01 |
| <i>Caprella algaceus</i> Vassilenko, 1967 | – | 0,01 \pm 0,01 |
| <i>Ampithoe lacertosa</i> Spence Bate, 1858 | – | 0,02 \pm 0,01 |
| <i>Pontogeneia intermedia</i> (?) Gurjanova, 1938 | – | 0,01 \pm 0,01 |
| <i>Monocorophium acherusicum</i> (Costa, 1853) | – | 0,01 \pm 0,01 |
| <i>Lacuna turrita</i> A. Adams, 1861 | – | 0,01 \pm 0,01 |

Примечание: прочерк (–) означает, что организмы не найдены.

Note: a dash (–) means that no organisms were found.

Таблица 5. Состав, эколого-географическая характеристика и относительное количественное обилие диатомовых водорослей микроперифитона из установки регулируемого потока воды (ноябрь 2019 г.)

Table 5. Composition, ecological and geographical characteristics, and relative quantitative abundance of diatoms of microperiphyton from the device of controlled water flow (November 2019)

| Таксон | Экологическая характеристика | | | Фитогеографическая характеристика | Количественное обилие |
|---|------------------------------|-----------|-------------|-----------------------------------|-----------------------|
| | Жизненная форма | Солёность | Сапробность | | |
| <i>Berkeleya rutilans</i> (Trentepohl ex Roth) Grunow, 1880 | Б | СМ | – | К | мс |
| <i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin, 1964 | БП | СМ | β | К | р |
| <i>Gomphonemopsis pseudexigua</i> (Simonsen) Medlin in Medlin & Round, 1986 | Б | М | – | АБТ | нр |
| <i>Licmophora abbreviata</i> C. Agardh, 1831 | Б | М | β | АБ | мс |
| <i>Licmophora flabellata</i> (Greville) C. Agardh, 1831 | Б | М | β | БТ | нр |
| <i>Melosira lineata</i> (Dillwyn) C. Agardh, 1824 | БП | СМ | α | АБТ | р |
| <i>Melosira moniliformis</i> var. <i>subglobosa</i> (Grunow) Hustedt, 1927 | БП | СМ | α | АБ | нр |
| <i>Navicula directa</i> (W. Smith) Ralfs, 1861 | Б | СМ | – | К | р |
| <i>Nitzschia hybrida</i> f. <i>hyalina</i> Proschkina-Lavrenko, 1963 | БП | С | – | Бо | нр |
| <i>Nitzschia longissima</i> (Brébisson) Ralfs, 1861 | Б | М | – | К | р |
| <i>Odontella aurita</i> (Lyngbye) C. Agardh, 1832 | БП | М | – | К | р |
| <i>Parlibellus delognei</i> (Van Heurck) E. J. Cox, 1988 | Б | М | – | К | р |
| <i>Rhabdonema arcuatum</i> (Lyngbye) Kützing, 1844 | БП | М | – | К | р |
| <i>Tabularia tabulata</i> (C. Agardh) Snoeijs, 1992 | Б | СМ | α | К | нр |

Примечание. Приуроченность к местообитанию: Б — бентосный; БП — бенто-планктонный. Отношение к солёности: М — морской; СМ — солоноватоводно-морской; С — солоноватоводный. Сапробиологическая приуроченность: α — альфа-мезосапробионт; β — бета-мезосапробионт. Фитогеографическая характеристика: К — космополит; АБ — аркто-бореальный; АБТ — аркто-бореально-тропический; БТ — бореально-тропический; Бо — бореальный. Относительное количественное обилие дано по шкале Вислоуха ([Диатомовые водоросли СССР..., 1974](#)): мс — массовое; ом — очень много; нр — нередко; р — редко.

Note. Confinement to habitat: Б – benthic; БП – benthic and planktonic. Confinement to salinity: М – marine; СМ – brackish-water and marine; С – brackish-water. Confinement to saprobiology: α – alpha-mesosaprobiont; β – beta-mesosaprobiont. Phytogeographic characteristics: К – cosmopolitan; АБ – arctic-boreal; АБТ – arctic-boreal-tropical; БТ – boreal-tropical; Бо – boreal. Relative quantitative abundance is given according to the Visloukh scale ([Diatomovye vodorosli SSSR..., 1974](#)): мс – mass; ом – a lot of; нр – often; р – rarely.

Максимального количественного развития достигали два вида колониальных диатомовых водорослей — *Berkeleya rutilans*, формирующая трубчатые слизистые макроколонии, и *Licmophora abbreviata*, развивающаяся на субстрате на ножках из полисахаридного матрикса (рис. 9). Количественное обилие этих видов в обрастании пластин из УРПВ оценено как «массовое». Оба этих вида — типичные эпифиты, образующие в естественных условиях взаимную связь с форофитом, каковая имеется у наземных растений с их эпифитами ([Рябушко, 2013](#)). Вышеуказанные виды являются основным компонентом диатомового перифитона антропогенных субстратов в акваториях залива Петра Великого Японского моря, а также побережья Японии ([Kasim & Mukai, 2006](#)), Китая ([Checklist of Marine Biota of Chinese Seas, 2008](#)) и Кореи ([Lee et al., 2015](#)).

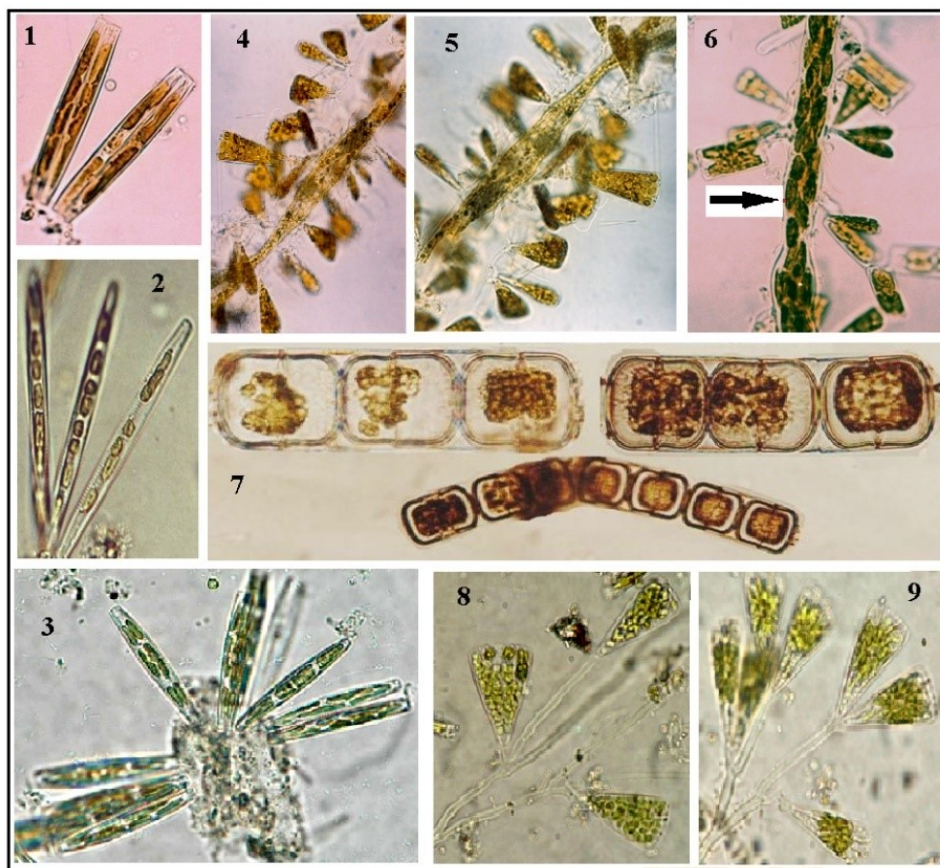


Рис. 9. Общий вид колоний массовых видов диатомовых водорослей микроперифитона экспериментальных пластин из установки регулируемого потока воды и бухты Тихая Заводь в ноябре 2019 г.: 1–3 — *Tabularia tabulata*; 4, 5, 8, 9 — *Licmophora abbreviata*; 6 — *Berkeleya rutilans* (стрелочкой указана трубчатая слизистая макроколония этого вида); 7 — *Melosira lineata*

Fig. 9. View of the mass colonial forms of diatoms from microperiphyton on the experimental plates from the device of controlled water flow and the Tikhaya Zavod Bay in November 2019: 1–3 – *Tabularia tabulata*; 4, 5, 8, 9 – *Licmophora abbreviata*; 6 – *Berkeleya rutilans* (the arrow indicates the tubular mucous macrocolony of this species); 7 – *Melosira lineata*

Высокие количественные показатели диатомовых водорослей *B. rutilans* и *L. abbreviata* на экспериментальных пластинах из УРПВ обусловлены в первую очередь наличием благоприятных гидролого-гидрохимических условий. Так, в позднеосенний период в большинстве мелководных бухт залива Петра Великого отмечены максимальные концентрации нитритов, нитратов, фосфатов и кремния — важнейших биогенных элементов, лимитирующих развитие диатомовых водорослей.

Обнаруженные в составе микроперифитона пластин из УРПВ виды диатомовых водорослей являются эвритермными — встречающимися круглогодично, независимо от температуры воды, поскольку в прибрежье залива Петра Великого поздней осенью водные массы подвержены существенному конвективному перемешиванию (Рябушко и Бегун, 2015).

Среди массовых видов с известной сапробиологической характеристикой в микроперифитоне пластин из УРПВ отмечена диатомовая водоросль *L. abbreviata* — бета-мезосапробионт и индикатор умеренного органического загрязнения вод. Массовое развитие этого вида и отсутствие индикаторов высокого органического загрязнения вод связано в первую очередь с отсутствием опреснения и антропогенной нагрузки в исследуемый период: забор воды для УРПВ осуществлялся на большей глубине и на удалении около 100 м от пирса.

На поверхности макрообрастания экспериментальных пластин, экспонированных с пирса МБС «Запад» ННЦМБ ДВО РАН в прибрежной зоне бухты Тихая Заводь, наблюдали светло-коричневый налёт толщиной около 1 мм. Микроскопирование показало, что налёт полностью состоит из макроколоний диатомовых водорослей. Зарегистрировано 12 видов и внутривидовых таксонов диатомей, также представленных различными жизненными формами: подвижными и неподвижными, прикреплёнными и свободноживущими, одиночными и колониальными (табл. 6). Количественный анализ микроперифитона экспериментальных пластин показал, что максимального развития достигали два колониальных вида диатомовых водорослей — *Melosira lineata* и *Odontella aurita*, относительное обилие которых оценено как «массовое» (рис. 9). Отмеченные виды являются бенто-планктонными, или тихопелагическими, способными обитать как в фитопланктоне, так и в микрофитобентосе, в составе обрастания каменистых грунтов и макрофитов, достигая массового развития поздней осенью и зимой (Рябушко, 2013). По данным исследований, проведённых ранее в акваториях залива Петра Великого Японского моря, указанные микроводоросли — неотъемлемый компонент перифитона экспериментальных пластин из разных материалов (Рябушко и Бегун, 2015). Остальные 10 видов диатомовых водорослей, зарегистрированных в микроперифитоне пластин из бухты Тихая Заводь (табл. 6), относятся к типичным эпифитам, развивающимся на макрофитах или твёрдых субстратах.

Таблица 6. Список видов, эколого-географическая характеристика и относительное обилие диатомовых водорослей микроперифитона пластин из бухты Тихая Заводь (ноябрь 2019 г.)

Table 6. Species list, ecological-geographical characteristics, and relative abundance of diatoms from microperiphyton on the plates from the Tikhaya Zavod Bay (November 2019)

| Таксон | Экологическая характеристика | | | Фитогеографическая характеристика | Количественное обилие |
|---|------------------------------|-----------|-------------|-----------------------------------|-----------------------|
| | Жизненная форма | Солёность | Сапробность | | |
| <i>Arachnodiscus ehrenbergii</i> J. W. Bailey ex Ehrenberg, 1849 | БП | М | – | К | р |
| <i>Berkeleya rutilans</i> (Trentepohl ex Roth) Grunow, 1880 | Б | СМ | – | К | нр |
| <i>Cocconeis stauroneiformis</i> H. Okuno, 1957 | Б | М | – | АБ | нр |
| <i>Gomphonemopsis pseudexigua</i> (Simonsen) Medlin in Medlin & Round, 1986 | Б | М | – | АБТ | р |
| <i>Licmophora abbreviata</i> C. Agardh, 1831 | Б | М | β | АБ | нр |
| <i>Licmophora flabellata</i> (Greville) C. Agardh, 1831 | Б | М | β | БТ | р |
| <i>Melosira lineata</i> (Dillwyn) C. Agardh, 1824 | БП | СМ | α | АБТ | мс |
| <i>Navicula directa</i> (W. Smith) Ralfs, 1861 | Б | СМ | – | К | нр |
| <i>Nitzschia longissima</i> (Brébisson) Ralfs, 1861 | Б | М | – | К | р |
| <i>Odontella aurita</i> (Lyngbye) C. Agardh, 1832 | БП | М | – | К | мс |
| <i>Rhabdonema arcuatum</i> (Lyngbye) Kützing, 1844 | БП | М | – | К | р |
| <i>Tabularia tabulata</i> (C. Agardh) Snoeijs, 1992 | Б | СМ | α | К | ом |

Примечание: как к таблице 5.

Note: as for Table 5.

Среди видов с известной сапробиологической характеристикой в микроперифитоне пластин из бухты Тихая Заводь отмечено два вида альфа-мезосапробионтов — индикаторов высокого органического загрязнения вод. Это *M. lineata* и *T. tabulata*; количественно обилие последней оценено на уровне «очень много». Эти таксоны являются солоноватоводно-морскими видами-убиквистами с высокими индексами сапробности, толерантными к воздействию неблагоприятных условий среды (нефтяное, химическое и термальное загрязнения) и способными переходить от автотрофного питания к гетеротрофному или смешанному (Mitra et al., 2014).

В данной работе впервые показана созданная нами новая установка регулируемого потока воды, на которую уже получено положительное решение Роспатента. Проведённый нами эксперимент представляет собой иллюстрацию возможностей УРПВ. Результаты её испытания в различных по абиотическим условиям биотопах получены всего за два месяца. Столь большое отличие в составе обрастания пластин в условиях установки и открытой бухты Тихая Заводь можно объяснить следующим. Известно, что обрастание действующих судов наиболее быстро формируется во время стоянок в портах, где происходит успешное оседание личинок обрастателей на корпус судна (Marine Fouling and Its Prevention, 1952). На пластинах в условиях управляемого потока воды практически отсутствует зоообрастание, а в составе фитоперифитона отмечено лишь 2 вида зелёных водорослей и 12 видов диатомей. Следует вывод, что для успешного оседания личинок макрообрастания необходимо периодически останавливать поток воды, имитируя стоянку судна. Однако это уже задача нашей последующей работы.

Необходимо также учитывать возможность «артефакта», вносимого самой установкой, в частности негативного воздействия насоса на личинок обрастателей. Косвенным подтверждением их выживания после прохождения насосов водозабора ТЭЦ и балластных вод является последующее формирование полноценного обрастания. В то же время многочисленные литературные данные свидетельствуют о том, что значительное количество представителей зоопланктона травмируется при прохождении вод через промышленные системы охлаждения. Однако, как показывают результаты исследований, проведённых на водоёмах-охладителях Курской, Калининской и Смоленской АЭС (Суздалева и др., 2007), далеко не во всех пробах зоопланктона из районов сброса обнаружено заметное число травмированных особей. Общий процент травмированных в системе водоснабжения особей зоопланктона, весьма высокий в начальный период эксплуатации водоёма-охладителя, постепенно снижается. Например, в настоящее время в системе охлаждения Курской АЭС доля погибшего зоопланктона, как правило, не превышает 45 % от численности организмов на водозаборе. В большинстве случаев процент существенно ниже. В отдельные периоды гибель зоопланктона здесь составляет всего 3–5 %, что меньше, чем при выедании рыбами в естественных условиях. Так, если в начале эксплуатации доля погибшего зоопланктона в системе охлаждения Змиёвской ГРЭС (Украина) составляла 75–80 %, то в последующий период она снизилась до 20 %. Ни одним из авторов не была зарегистрирована 100%-ная гибель личинок обрастателей. Данный факт может послужить объяснением массового развития макрообрастания систем охлаждения предприятий после прохождения насосов: для его формирования вполне достаточно ограниченного количества личинок. В своём эксперименте мы пока не имеем представления о том, как установка воздействует на личинок обрастателей, и потому не можем игнорировать вероятность массовой гибели меропланктона после прохождения насосов. В данной ситуации необходимо дополнительное изучение адекватности нашей установки. Мы в ближайшее время планируем провести исследование выживания планктона после прохождения насосов созданной нами УРПВ.

Заключение. Представлена созданная нами новая установка регулируемого потока воды, получившая положительное решение Роспатента; проиллюстрированы её возможности. В ходе двухмесячного эксперимента по испытанию УРПВ в биотопах с различными абиотическими

условиями получены результаты, которые демонстрируют значительные отличия в составе обрастания пластин, экспонированных на установке и в открытой бухте Тихая Заводь.

В условиях УРПВ в сообществе обрастания доминируют диатомовые водоросли; зоокомпонент практически отсутствует. На пластинах из открытого залива представлено обычное для переменной ватерлинии судов либо осушной зоны гидротехнических сооружений сообщество зелёных водорослей *Ulva linza* и усоногих раков *Amphibalanus improvisus*. Последний является видом-интродуцентом; он успешно акклиматизирован в заливе Петра Великого. Статистический анализ доказывает кардинальные (качественные и количественные) различия ассоциаций обрастания пластин, экспонированных в бухте Тихая Заводь и на УРПВ; по сути, эти различия носят сукцессионный характер.

На экспериментальных пластинах из обоих исследованных районов зарегистрировано развитое сообщество микроперифитона, причём отмечены существенные различия в составе доминирующих таксонов, в их количественных показателях и сапробиологических характеристиках. Это связано главным образом с разной гидродинамикой управляемого потока и открытых вод, а также с уровнем эвтрофирования вод, который определяет развитие таксонов, толерантных к высокой биогенной нагрузке. На основании вышесказанного можно утверждать об эффективности использования созданной нами УРПВ для исследования закономерностей формирования сообществ обрастания в разных гидродинамических потоках. Основной практический вывод — то, что установка рекомендована для испытания и проверки свойств защитных покрытий на тестируемых субстратах, включая противообрастающие и антикоррозийные покрытия.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта «Комплексная программа фундаментальных научных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» на 2018–2020 гг.» (№ 18-3-014, часть 2).

Благодарность. Авторы выражают благодарность коллегам из ИАПУ ДВО РАН Ю. Н. Кульчину, Е. П. Субботину и А. И. Никитину и сотруднику ННЦМБ ДВО РАН А. Н. Николенко, принимавшим участие в организации работ и сборе материала. Также авторы благодарят сотрудника ДВНИГМИ А. В. Мощенко за помощь в статистической обработке материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Григорьева Н. И., Кашенко С. Д. Исследование межгодовой и сезонной изменчивости термогалинных условий в заливе Восток (залив Петра Великого, Японское море) // *Известия ТИНРО*. 2010. Т. 162. С. 242–255. [Grigoryeva N. I., Kashenko S. D. Study on interannual and seasonal variations of thermohaline conditions in the Vostok Bay (Peter the Great Bay, Japan Sea). *Izvestiya TINRO*, 2010, vol. 162, pp. 242–255. (in Russ.)]
2. *Диатомовые водоросли СССР. Ископаемые и современные*. Т. 1 / отв. ред. А. И. Прошкина-Лавренко. Ленинград : Наука, 1974. 402 с. [*Diatomovye vodorosli SSSR. Iskopaemye i sovremennye*. Vol. 1 / A. I. Proshkina-Lavrenko (Ed.). Leningrad : Nauka, 1974, 402 p. (in Russ.)]
3. Жадин В. И. *Методы гидробиологического исследования*. Москва : Высшая школа, 1969. 191 с. [Zhadin V. I. *Metody gidrobiologicheskogo issledovaniya*. Moscow : Vysshaya shkola, 1969, 191 p. (in Russ.)]
4. Звягинцев А. Ю. *Морское обрастание в северо-западной части Тихого океана*. Владивосток : Дальнаука, 2005. 432 с. [Zvyagintsev A. Yu. *Marine Fouling in the North-Western Part of the Pacific Ocean*. Vladivostok : Dal'nauka, 2005, 432 p. (in Russ.)]
5. Иващенко Э. А. Циркуляция вод залива Петра Великого // *Географические исследования шельфа дальневосточных морей*. Владивосток : Изд-во ДВГУ, 1993. С. 31–61. [Ivashchenko E. A. Tsirkulyatsiya vod zaliva Petra Velikogo. In: *Geograficheskie issledovaniya shel'fa dal'nevostochnykh morei*. Vladivostok : Izd-vo DVGU, 1993, pp. 31–61. (in Russ.)]
6. Остриков В. В., Звягинцев А. Ю., Михайлов С. Р., Метельская Р. Н., Пукас Г. П., Курдин А. В. *Судовое устройство для биологических и коррозионных испытаний* : Авт. свид-во № 1415626 от 08.04.1988. Москва : ВНИИПИ Гос. ком. СССР по делам изобрет. и откр.,

- [1988]. 3 с. [Ostrikov V. V., Zvyagintsev A. Yu., Mikhailov S. R., Metel'skaya R. N., Pukas G. P., Kurdin A. V. *Sudovoe ustroystvo dlya biologicheskikh i korrozionnykh ispytaniy* : Avt. svid-vo no. 1415626 ot 08.04.1988. Moscow : VNIPI Gos. kom. SSSR po delam izobret. i otkr., [1988], 3 p. (in Russ.)]
7. Патент № 2728490 Российская Федерация, МПК G01M 10/00, G01N 17/00 (2006.01). *Способ исследования свойств защитных покрытий в потоке морской воды и установка для его осуществления* : № 2019142558 : заявл. 16.12.2019 : опубл. 29.07.2020, Бюл. № 22 / Масленников С. И., Цветников А. К., Николенко А. Ю., Никитин А. И., Субботин Е. П. ; патентообладатели: ООО «Морской биотехнопарк», ООО «Владфорум». 2 с. [Patent no. 2728490 Rossiiskaya Federatsiya, МПК G01M 10/00, G01N 17/00 (2006.01). *Sposob issledovaniya svoistv zashchitnykh pokrytii v potoke morskoi vody i ustanovka dlya ego osushchestvleniya* : no. 2019142558 : appl. 16.12.2019 : publ. 29.07.2020, Byul. no. 22 / Maslennikov S. I., Tsvetnikov A. K., Nikolenko A. Yu., Nikitin A. I., Subbotin E. P. ; assignees: ООО "Morskoi biotekhnopark", ООО "Vladforum". 2 p. (in Russ.)]
 8. Рябушко Л. И. *Микрофитобентос Чёрного моря*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 416 с. [Ryabushko L. I. *Microphytobenthos of the Black Sea*. Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2013, 416 p. (in Russ.)]
 9. Рябушко Л. И., Бегун А. А. *Диатомовые водоросли микрофитобентоса Японского моря*. Севастополь ; Симферополь : Н. Орианда, 2015. Т. 1. 288 с. [Ryabushko L. I., Begun A. A. *Diatoms of Microphytobenthos of the Sea of Japan*. Sevastopol ; Simferopol : N. Orianda, 2015, vol. 1, 288 p. (in Russ.)]
 10. *Состояние и устойчивость экосистем дальневосточных морей России* : отчёт о НИР / Тихоокеанский океанологический институт ; рук. Лобанов В. Б. Владивосток, 2001. 290 с. [*Sostoyanie i ustoychivost' ekosistem dal'nevostochnykh morei Rossii* : otchet o NIR. Tikhookeanskii okeanologicheskii institut ; ruk. Lobanov V. B. Vladivostok, 2001, 290 p. (in Russ.)]
 11. Суздалева А. Л., Попов А. В., Кучкина М. А., Фомин Д. В., Минин Д. В. Изменение химического состава воды и планктона при прохождении через систему технического водоснабжения АЭС // *Безопасность энергетических сооружений*. 2007. Вып. 16. С. 201–215. [Suzdaleva A. L., Popov A. V., Kuchkina M. A., Fomin D. V., Minin D. V. *Izmenenie khimicheskogo sostava vody i planktona pri prokhozhenii cherez sistemu tekhnicheskogo vodosnabzheniya AES. Bezopasnost' energeticheskikh sooruzhenii*, 2007, vol. 16, pp. 201–215. (in Russ.)]
 12. Христофорова Н. К., Наумов Ю. А., Арзамасцев И. С. Тяжёлые металлы в донных осадках залива Восток (Японское море) // *Известия ТИНРО*. 2004. Т. 136. С. 278–289. [Khristoforova N. K., Naumov Yu. A., Arzamastsev I. S. *Heavy metals in bottom sediments of Vostok Bay (Japan Sea)*. *Izvestiya TINRO*, 2004, vol. 136, pp. 278–289. (in Russ.)]
 13. Шитиков В. К., Розенберг Г. С. *Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R*. Тольятти : Кассандра, 2013. 314 с. [Shitikov V. K., Rozenberg G. S. *Randomizatsiya i butstrep: statisticheskii analiz v biologii i ekologii s ispol'zovaniem R*. Tolyatti : Cassandra, 2014, 314 p. (in Russ.)]
 14. *Checklist of Marine Biota of Chinese Seas* / J. Y. Liu (Ed.). Beijing : Science Press, Academia Sinica, 2008, 1267 p.
 15. Fitzsimmons K. *Tilapia aquaculture in Mexico*. In: *Tilapia Aquaculture in the Americas* / B. A. Costa-Pierce, J. E. Rakocy (Eds). Baton Rouge : The World Aquaculture Society, 2000, vol. 2, pp. 171–183.
 16. Guiry M. D., Guiry G. M. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication. Galway : National University of Ireland, 2020. URL: <https://www.algaebase.org> [accessed: 03.12.2020].
 17. Kasim M., Mukai H. Contribution of benthic and epiphytic diatoms to clam and oyster production in the Akkeshi-ko estuary. *Journal of Oceanography*, 2006, vol. 62, pp. 267–281. <https://doi.org/10.1007/s10872-006-0051-9>
 18. Lee S. D., Yun S. M., Park J. S., Lee J. H. Floristic survey of diatom in the three Islands (Baeknyeong, Daecheong, Socheong) from Yellow Sea of Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 2015, vol. 38, iss. 4, p. 563–598. <https://doi.org/10.5141/ecoenv.2015.059>
 19. *Marine Fouling and Its Prevention* : prepared for Bureau of Ships, Naval Department

- / Woods Hole Oceanographic Institution. Menasha : Georg Banta Publ. Co., 1952, 388 p. (Contribution / Woods Hole Oceanographic Institution ; no. 580). <https://doi.org/10.1575/1912/191>
20. Mitra A., Flynn K. J., Burkholder M., Berge T., Calbet A., Raven J. A., Granéli E., Glibert P. M., Hansen P. J., Stoecker D. K., Thingstad F., Tillmann U., Våge S., Wilken S., Zubkov M. V. The role of mixotrophic protists in the biological carbon pump. *Biogeosciences*, 2014, vol. 11, iss. 4, pp. 995–1005. <https://doi.org/10.5194/bg-11-995-2014>
21. Patent no. US8245440B2 United States, IPC A01G31/00; A01G7/00; A01H13/00; *Aquaculture Raceway Integrated Design* : US82410610A.: appl. 25.06.2010 : publ. 21.08.2012 / M. Kacira, P. Li, R. D. Ryan, P. M. Waller ; appl. Arizona Board of Regents of University of Arizona. 2012. 1 p. <https://patents.google.com/patent/US8245440B2/en>
22. Pearce C. M., Daggett T. L., Robinson S. M. C. Effect of binder type and concentration on prepared feed stability and gonad yield and quality of the green sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis*. *Aquaculture*, 2002, vol. 205, iss. 3–4, pp. 301–323. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00685-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00685-8)

STUDY OF FOULING COMMUNITIES SUCCESSION UNDER CONDITIONS OF THE DEVICE OF CONTROLLED WATER FLOW

A. Yu. Zvyagintsev¹, S. I. Maslennikov¹, A. K. Tsvetnikov²,
A. A. Begun¹, and N. I. Grigoryeva¹

¹A. V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology, FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

²Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

E-mail: ayzvyagin@gmail.com

For testing the anticorrosive and antifouling protective coatings, a ground stand is developed: the device of controlled water flow. The relevance of the study is undeniable, given the practical significance of the problem. The stand is connected to the main of sea running water. The device makes it possible to imitate the motion of aqueous flow around the vessel, thus simulating the conditions of moving amphibious facility. The aim of this work is to present for the first time the new device, created by us, which received a positive decision of Rospatent (Federal Service for Intellectual Property). For two months, full-scale field tests were carried out. They have showed essential qualitative and quantitative differences in the composition of fouling communities on the experimental plates, placed into the device of controlled water flow and suspended in the water column on the pier of the Zapad marine biological station of the National Scientific Center of Marine Biology, FEB RAS. Benthic diatoms predominate in the periphyton community under the conditions of the device of controlled water flow; there is practically no zoofouling. Phytocenosis of green algae, which is common for a vessel variable loadline or a hydraulic structure drainage zone, is presented on the plates from the open bay. The efficiency of using the device of controlled water flow, created by us, is shown for studying the patterns of formation of the fouling communities in different hydrodynamic flows. The main practical conclusion is that the device can be used to verify the properties of protective coatings on the substrates tested, *inter alia* antifouling and anticorrosive coatings.

Keywords: device, controlled flow, fouling community, green algae, diatoms