

Оценка макрообрастания водозаборного туннеля ТЭЦ-2 Владивостока с применением лазерных технологий

С. И. Масленников^{1,2}, А. Ю. Звягинцев¹, А. А. Бегун^{1*}

¹Национальный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского
ДВО РАН, Владивосток, Россия

²Дальневосточный федеральный университет,
п. Аякс Приморского края, о. Русский, Россия

* e-mail: andrejbegun@yandex.ru

Аннотация

Впервые проведена точная количественная съемка макрообрастания подземного водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 с применением лазерных технологий для разработки стратегии защиты от биологических повреждений системы охлаждения морской водой. В составе биообрастания туннеля обнаружен 91 вид беспозвоночных, принадлежащих к различным таксономическим группам. Установлено максимальное развитие макрообрастания в нижней части водозаборного туннеля с доминированием тихоокеанской мидии *Mytilus trossulus*. В обрастании верхней части туннеля отмечено количественное преобладание прикрепленных многощетинковых червей рода *Hydroides*. На бетонных участках туннеля зарегистрированы максимальные значения массы илистых биоотложений, в то время как для стальных участков были характерны известковые биоотложения. Отмечено, что общая сырая биомасса макрообрастания туннеля больше биомассы макрообрастателей в 35–50 раз. Это различие свидетельствует о преобладающей роли организмов мейобентоса и микроперифитона в формировании сообщества обрастания. Показаны различия видового богатства и количественных показателей обрастания туннеля в 2015 г. по сравнению с 2001 г. Таким образом, проведенная оценка макрообрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 позволяет сделать вывод о необходимости комплексной стратегии защиты системы охлаждения от морского обрастания, заключающейся в сочетании физических методов и других технологических приемов.

Ключевые слова: макрообрастание, водозаборный туннель, многощетинковые черви, разноногие раки, двустворчатые моллюски, биомасса, лазерные технологии

Благодарности: авторы выражают благодарность коллегам из ДВФУ А. Т. Беккеру, П. В. Анохину, Е. Е. Помникову и Р. С. Тютрину, принимавшим участие в организации работ и сборе материала. Авторы благодарят н. с. ННЦМБ ДВО РАН Н. Л. Демченко за помощь при создании рисунков.

© Масленников С. И., Звягинцев А. Ю., Бегун А. А., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Масленников С. И., Звягинцев А. Ю., Бегун А. А. Оценка макрообрастания водозаборного туннеля ТЭЦ-2 г. Владивостока с применением лазерных технологий // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 81–94. EDN IZZUPG.

Estimation of Macrofouling of the Water Intake Tunnel of the Vladivostok CHP-2 Using Laser Technologies

S. I. Maslennikov^{1,2}, A. Yu. Zvyagintsev¹, A. A. Begun^{1*}

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

² Far Eastern Federal University, Ayaks, Russkiy Island, Russia

* e-mail: andrejbegun@yandex.ru

Abstract

For the first time, an accurate quantitative survey of macrofouling in the underground water intake tunnel of the Vladivostok combined heat and power plant (CHP-2) was carried out using laser technologies to develop a strategy for protecting the seawater cooling system from biological damage. In the tunnel biofouling, 91 species of invertebrates belonging to various taxonomic groups were found. The maximum development of macrofouling was established in the lower part of the water intake tunnel with the dominance of the Pacific mussel *Mytilus trossulus*. In the fouling of the tunnel upper part, a quantitative predominance of attached polychaete worms of the genus *Hydroides* was noted. For the concrete sections of the tunnel, the maximum values of the mass of silt biodeposits were recorded, while the steel sections were characterized by calcareous biodeposits. It was noted that the total raw biomass of tunnel macrofouling was 35–50 times greater than the biomass of macrofouling organisms. This difference indicates the predominant role of meiobenthos and microperiphyton organisms in the formation of the fouling community. The differences in the species richness and quantitative indicators of fouling of the tunnel in 2015 compared to 2001 are shown. Thus, the macrofouling estimation of the water intake tunnel of the Vladivostok CHP-2 allows concluding about the need for a comprehensive strategy for protecting the cooling system from marine fouling. Such a strategy is assumed to combine physical methods and other technological methods.

Keywords: macrofouling, water intake tunnel, polychaete worms, different feet crustaceans, bivalve mollusks, biomass, laser technologies

Acknowledgments: The authors express their gratitude to colleagues from FEFU A. T. Bekker, P. V. Anokhin, E. E. Pomnikov and R. S. Tyutrin, who took part in organizing the work and collecting material. The authors express their gratitude to their colleague N. S. Demchenko, who helped to create the pictures.

For citation: Maslennikov, S.I., Zvyagintsev, A.Yu. and Begun, A.A., 2024. Estimation of Macrofouling of the Water Intake Tunnel of the Vladivostok CHP-2 Using Laser Technologies. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 81–94.

Введение

Сообщества обрастания, развивающиеся в техноэкосистемах водоемов-охладителей энергетических станций, являются причиной разнообразных биологических помех в работе оборудования. Морское обрастание включает самые разные организмы, способные прикрепляться к твердой поверхности подводных субстратов. К ним относятся микрообрастатели (бактерии, простейшие, микроскопические грибы и микроводоросли, составляющие биопленку или слизь) и макрообрастатели (морские водоросли, двустворчатые моллюски, преимущественно устрицы и мидии, ракообразные, мшанки, гидроиды и асцидии). Наибольшие проблемы возникают в системах охлаждения промышленных предприятий, к которым относятся водозаборы электростанций [1–3]. Ущерб от зарастания водоводов и биоповреждений морскими организмами исчисляется миллионами долларов¹⁾. В последние десятилетия в промышленно развитых странах прослеживается тенденция к перемещению тепловых электростанций и промышленных предприятий на морские побережья. Например, только в США более трети силовых электростанций страны располагаются недалеко от морских берегов. Среднесуточный забор морской воды этими станциями уже в 1970-е гг. исчислялся миллиардами литров²⁾.

Техноэкосистемы электростанций с охлаждением морской водой в последние десятилетия в мировой практике исследуются достаточно интенсивно [4, 5], хотя в России (и бывшем СССР) такие исследования проводятся нечасто [6]. Кроме макрообрастания, выявлены изменения количественной структуры фитопланктона (как начального звена трофической сети) при прохождении через систему охлаждения электростанции. В составе сообщества микроводорослей водовода отмечено высокое обилие бентосных форм при аномальном удлинении летне-осеннего вегетационного сезона [7].

Предыдущие работы по данной проблеме подробно освещены в монографии [8], в которой основное внимание уделено исследованию водоемов-охладителей энергетических станций на примере ТЭЦ-2 г. Владивостока (далее – ВТЭЦ-2). Получены сведения о составе, количественном распределении и особенностях формирования сообществ обрастания разных субстратов в системе охлаждения. Разработаны практические рекомендации по корректировке сроков термообработки туннелей и глубины установки водозабора на основании исследования биологических особенностей основных видов макрообрастателей.

В 2015 г. научный коллектив Института биологии моря им. А. В. Жирмунского ДВО РАН (в настоящее время ННЦМБ ДВО РАН) совместно со специалистами из ДВФУ продолжил комплексные многолетние исследования сообщества обрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2. Вызвано это недостаточной эффективностью ежегодной термообработки туннелей и ручной очистки от обрастания во время их осушки. С первого обследования морской техно-

¹⁾ Marine fouling and its prevention / Woods Hole Oceanographic Institute. Menasha : George Banta Publishing Co., 1952. 388 p. doi:10.1575/1912/191

²⁾ Young C.-S. Thermal discharges into the coastal waters of Southern California // Southern California Coastal Water Research Project. Los Angeles, 1971. 30 p. URL: https://ftp.sccwrp.org/pub/download/DOCUMENTS/TechnicalReports/0003_ThermalDischarges.pdf (date of access: 24 November 2024).

экосистемы ВТЭЦ-2 до настоящего исследования прошло 14 лет, при этом термообработку и механическую очистку от обрастания совместно с осушкой туннелей проводили регулярно. В связи с этим возникла необходимость в повторном исследовании видового состава обрастания водозаборного туннеля с различными гидродинамическими условиями на разных его участках и в получении точных данных о количественном распределении макрообрастания.

Таким образом, цель исследования заключается в точной оценке распределения организмов макрообрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 г. Владивостока с использованием лазерного дальномера. Ранее при исследовании биообрастания водозаборных туннелей электростанций такие инструменты не применяли.

Материал и методика

Водозаборный туннель ВТЭЦ-2 начинается в водозаборном ковше в б. Сухопутной Уссурийского залива и состоит из стальной трубы длиной 250 м, внутренним диаметром 1.5 м (рис. 1, *c, d*; рис. 2, *a*), которая переходит в бетонный подземный туннель длиной 970 м внутренним диаметром 2 м (рис. 1, *d*; рис. 2, *b – f*). Туннель проходит в твердой горной породе под микрорайоном Владивостока и заканчивается также стальной трубой внутренним диаметром 1.5 м, выходящей на территории электростанции (рис. 1, *c, d*). Перепад уровня высоты от насосной станции до электростанции составляет 42 м. Вода из насосной станции в туннель подается через четыре вращающиеся стальные сетки с ячейей диаметром 3 мм. Скорость водного потока в туннеле составляет 2 м/с, весь цикл прохождения воды через туннель составляет около 2 мин. Температура воды при прохождении через систему охлаждения ТЭЦ повышается на 5–6 °С [6]. Нагретая морская вода из ТЭЦ сбрасывается в р. Объяснения, а далее – в кутовую часть б. Золотой Рог.

Пробы макрообрастания отбирали 5 мая 2015 г. во время осушки туннеля с площадки 10 × 10 см, которую обозначали стальной рамкой (рис. 2, *a – f*). Пробы отбирали скребком с длиной лезвия 10 см с нижней, боковой и верхней частей трубы в трех повторях. Расстояние между точками отбора проб измеряли с помощью лазерного дальномера *Leica DISTO A8* – современной профессиональной модели со встроенным цифровым видеоискателем, позволяющим выполнять измерения даже в том случае, когда лазерная точка при наведении на объект измерения не видна. Встроенный датчик угла наклона значительно расширяет область применения прибора, так как с его помощью можно измерять наклон, горизонтальное положение, выполнять косвенные измерения в случаях, когда одна из точек измерения не отражает лазерный луч.

Количественные данные об общей сырой биомассе получены путем взвешивания мешков с пробами и дальнейшего пересчета на удельную плотность. Такой подход включает в массу все, что попадает в пробоотборник, включая илистые отложения, которые при камеральной обработке, как правило, не учитывают и смывают в дренаж при промывке проб. Данный метод позволяет учесть массу не только макрообрастания, но и биоотложений, присутствующих на субстрате, а также микрופерифитона, детрита и фекальных комочков организмов-образователей. Камеральная обработка проб проводилась в лаборатории экологии шельфовых сообществ ИБМ ДВО РАН по общепринятой методике [8].

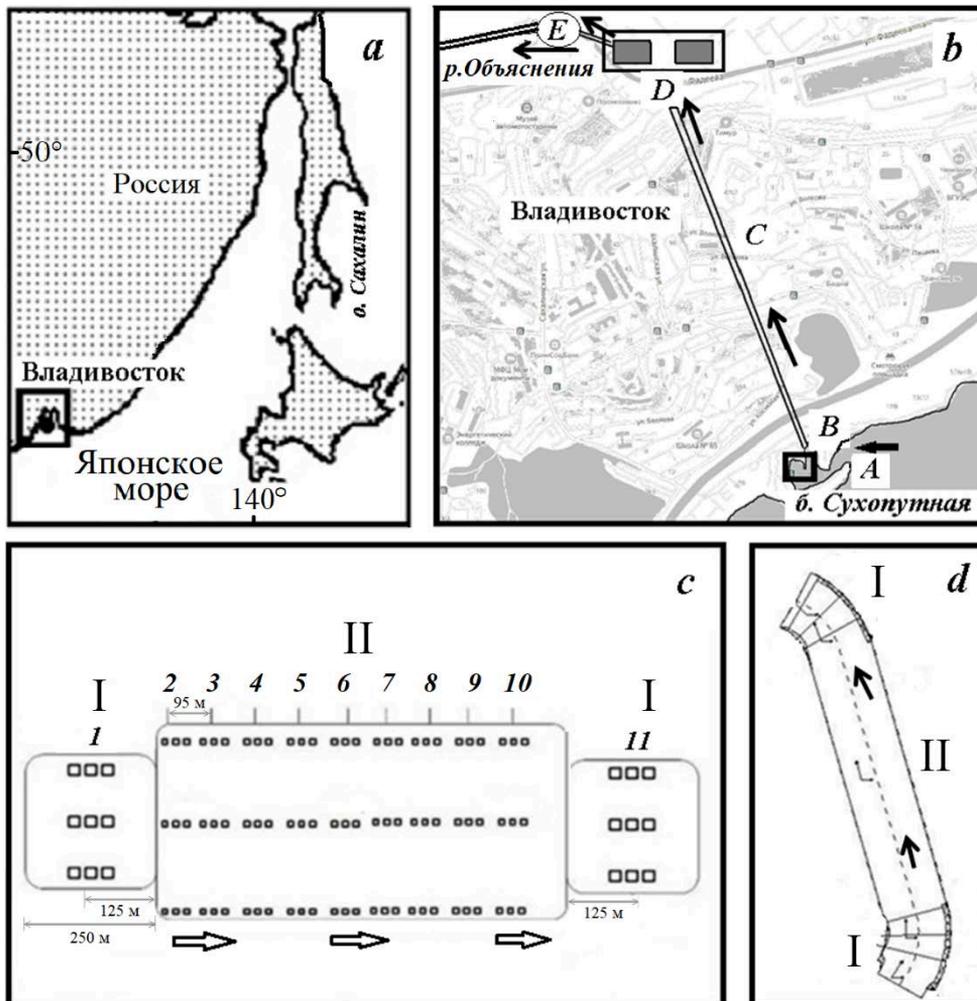


Рис. 1. Карта-схема района исследования и строения водозабора ВТЭЦ-2 г. Владивостока: *a* – карта района исследования; *b* – схема расположения водозабора и движения воды на карте: *A* – б. Сухопутная, *B* – насосная станция, *C* – бетонный туннель, *D* – ВТЭЦ-2, *E* – сбросной канал; *c*, *d* – схема строения водозаборного туннеля и план-схема маршрута отбора материала: *I* – стальная труба, *II* – бетонная труба. Стрелками обозначено направление движения воды в туннеле и за его пределами, квадратами – станции отбора проб макрообрастания (*I–II*)

Fig. 1. Map-scheme of the study area and the structure of the water intake of the combined heat and power plant (CHP-2) in Vladivostok: *a* – map of the study area; *b* – scheme of the location of the water intake and water movement on the map: *A* – Sukhoputnaya Bay, *B* – pumping station, *C* – concrete tunnel, *D* – CHP-2, *E* – discharge channel; *c*, *d* – scheme of the structure of the water intake tunnel and plan-scheme of the material sampling route: *I* – steel pipe, *II* – concrete pipe. The arrows indicate the direction of water movement in the tunnel and beyond it, the squares are stations of macrofouling sampling (*I–II*)



Р и с. 2. Процесс пробоотбора и общий вид обрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 на разных его участках: *a* – начало осмотра туннеля; *b* – обрастание сидящими многощетинковыми червями рода *Hydroides*; *c* – пробная очистка стенки для оценки интенсивности обрастания; *d* – «щетки» мидий; *e* – сплошное обрастание туннеля мидией; *f* – устричное обрастание «низа» туннеля

Fig. 2. The sampling process and general view of fouling of the water intake tunnel of CHP-2 in its different sections: *a* – beginning of the tunnel inspection, *b* – fouling by sessile polychaete worms of the genus *Hydroides*, *c* – test cleaning of the wall to assess the fouling intensity, *d* – mussel fouling, *e* – continuous mussel fouling of the tunnel, *f* – oyster fouling on the tunnel bottom

Видовую идентификацию осуществляли сотрудники вышеуказанной лаборатории н. с. И. Л. Алалыкина (полихеты) и н. с. Н. Л. Демченко (амфиподы). Цифровые карты распределения количественных характеристик биообрастания внутри туннеля построены н. с. Н. Л. Демченко с помощью картографического пакета для моделирования и анализа данных, создания трехмерных карт и моделей и их визуализации *Surfer*.

Результаты

Осмотр водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 показал, что количество обрастания на стенках туннеля постепенно уменьшается от ст. 1 к ст. 10 (рис. 1, с). Общий характер обрастания в туннеле оказался очаговым с преобладанием мидии тихоокеанской *Mytilus trossulus* A. Gould, 1850 и устрицы гигантской *Magallana gigas* (Thunberg, 1793). Начальные участки водовода, представляющие собой стальную трубу, имеют мидиевое обрастание различной интенсивности. Длина створки обнаруженных мидий составляет менее 30 мм, что позволяет сделать предположение о том, что возраст обрастания составляет 15–17 месяцев. По мере удаления от входа и насосной станции мидиевое обрастание становится менее интенсивным, в сообществе обрастания начинает доминировать устрица (рис. 2, d–f).

Таксономический состав обрастания туннеля в 2015 г. характеризовался достаточно высоким разнообразием беспозвоночных (рис. 3, b). Динамика распределения общей сырой биомассы обрастания вдоль туннеля представлена на рис. 4. Сырая биомасса обрастания имеет тенденцию к увеличению в начале туннеля на бетонном субстрате. В середине туннеля биомасса резко снижается и вновь нарастает на стальном субстрате в конце туннеля.

Отличие от картины распределения общей сырой биомассы макрообрастания в туннеле, показатели общей биомассы организмов-обрастателей после камеральной обработки проб имеют несколько иную тенденцию (рис. 4). Так, максимальное значение общей биомассы зарегистрировано в начале туннеля на ст. 1, после чего ее значение резко снижается, выравнивается и слегка возрастает на ст. 10. Для сырой общей биомассы наблюдается прямо противоположное соотношение. В биомассе двустворчатых моллюсков доминирует мидия, на втором месте – устрица. Мидия преобладает в нижней части туннеля, устрица имеет преимущество сразу на нескольких станциях в средней части туннеля.

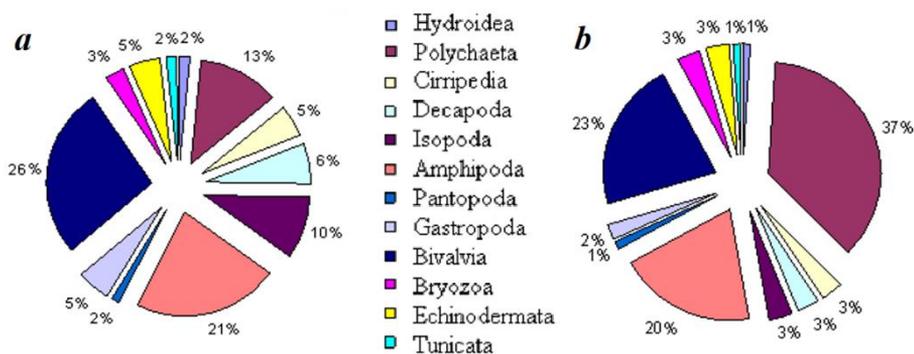
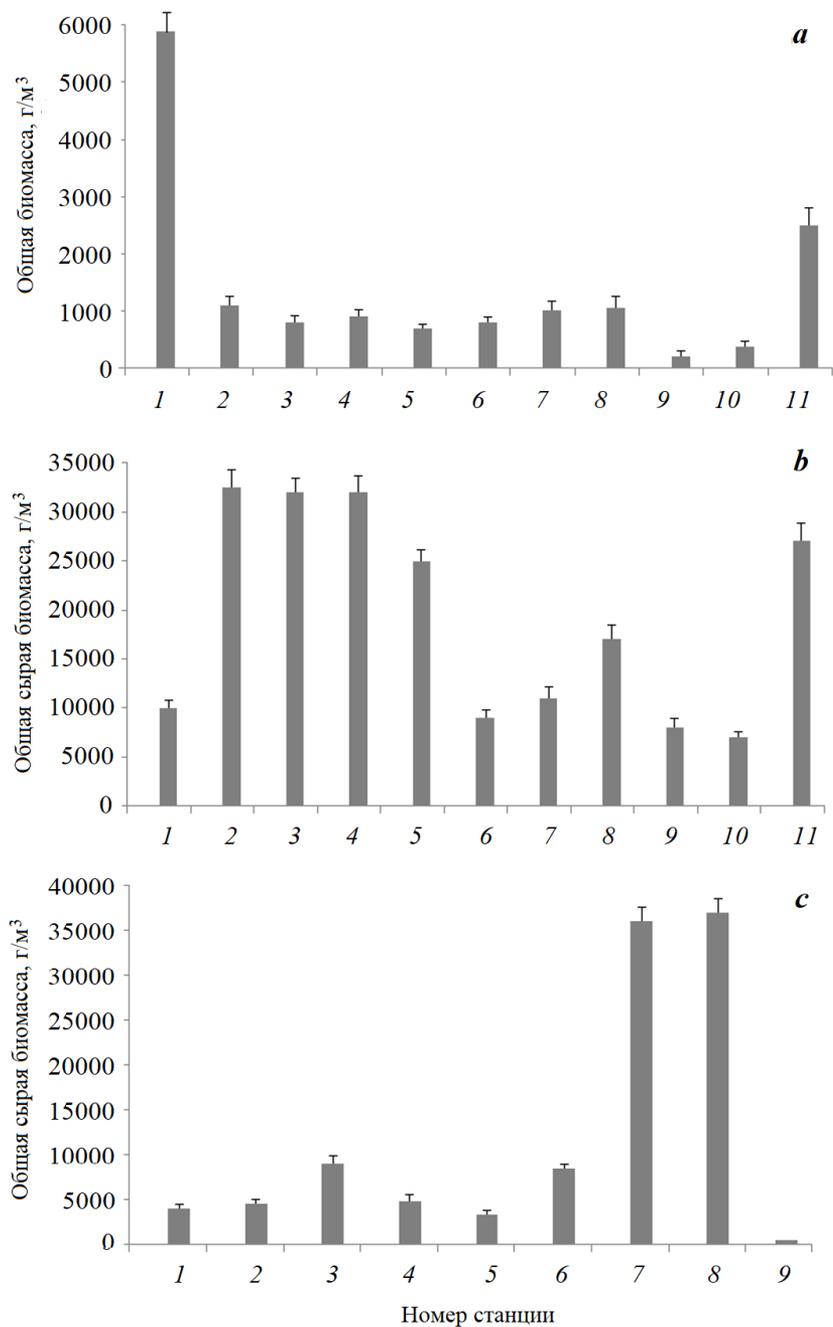


Рис. 3. Таксономический состав обрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 в 2001 (a) и в 2015 гг. (b)

Fig. 3. Taxonomic composition of fouling of the CHP-2 water intake tunnel in 2001 (a) and in 2015 (b)

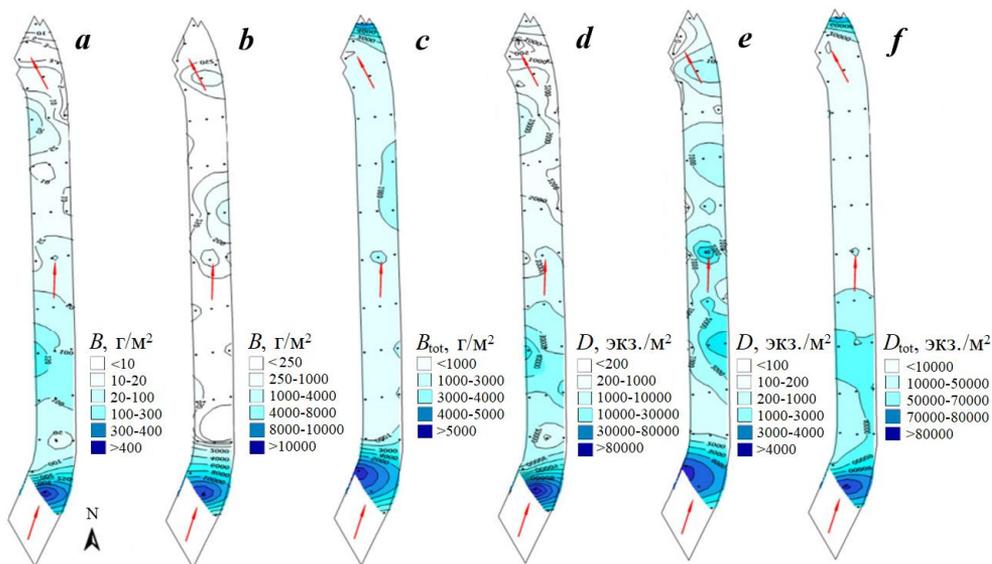


Р и с . 4. Динамика распределения общей биомассы (a) и общей сырой биомассы (b, c) макрообрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 в разные годы: a, b – 2015 г.; c – 2001 г.

F i g . 4. Distribution dynamics of total biomass (a) and total raw biomass (b, c) of macrofouling of the water intake tunnel of CHP-2 in different years: a, b – 2015; c – 2001

Показана огромная разница между биомассой сырых проб и биомассой макрообрастателей, отношение этих величин может составлять от 35 до 50 (рис. 4, *a, b*). Это свидетельствует о преобладающей роли мейобентоса и микроперифитона (и продуктов их жизнедеятельности) в формировании сообщества организмов. Набегающий поток чистой морской воды создает благоприятные условия для их развития, и они закрепляются среди макроорганизмов сообщества обрастания туннеля. В более ранних работах количественная роль мейофауны и микроперифитона в водозаборных туннелях электростанций с охлаждением морской водой не учитывалась.

Полученные данные позволили оценить распределение макрообрастания различных участков туннеля, биомассы и плотности поселения фонообразующих видов (рис. 5). Разноногие раки преобладают по плотности поселения почти на всей длине туннеля, за исключением ст. 10. Для биомассы аналогичная картина наблюдается для двустворчатых моллюсков.



Р и с . 5. Схема распределения групп организмов, обеспечивающих максимальную плотность и биомассу в сообществе биообрастания водозаборного туннеля ВТЭЦ-2: биомасса B Amphipoda (*a*) и Bivalvia (*b*), общая биомасса макрообрастания B_{tot} (*c*), плотность D Amphipoda (*d*) и Bivalvia (*e*), общая плотность макрообрастания D_{tot} (*f*). Красными стрелками обозначен ток воды

Fig. 5. Distribution diagram of groups of organisms that provide maximum density and biomass in the biofouling community of the CHP-2 water intake tunnel: biomass B of Amphipoda (*a*) and Bivalvia (*b*), total macrofouling biomass B_{tot} (*c*), density D of Amphipoda (*d*) and Bivalvia (*e*), total macrofouling density D_{tot} (*f*). The red arrows indicate the water flow

Обсуждение

Сравнение таксономического состава макрообрастания туннеля ВТЭЦ-2 за 2001 и 2015 гг. показало, что за 14 лет общее число видов увеличилось почти на треть – 63 и 91 вид соответственно (рис. 3). В соотношении обилия наиболее массовых видов макрообрастания прослеживается общая тенденция – по числу видов доминируют двустворчатые моллюски, многощетинковые черви и разноногие раки. В то же время в 2015 г. число видов полихет увеличилось в четыре раза по сравнению с данными исследования 2001 г. Соотношение остальных групп видов-обрастателей варьировало незначительно.

В 2001 г. нарастание общей сырой биомассы в начале туннеля, как в 2015 г., не наблюдали, однако отмечен ее резкий скачок в районе поворота на последних станциях, а также в зоне повышенной турбулентности потока – перехода от стальной трубы к бетонному туннелю и наоборот.

Результаты проведенной оценки свидетельствуют об очаговом характере распределения организмов макрообрастания в водозаборном туннеле ВТЭЦ-2. Такая мозаичность в распределении количественного обилия обрастания прослеживалась как в 2001 г. [8], так и в 2015 г. Основные скопления фонообразующих видов наблюдаются на различающихся по гидродинамическим условиям участках туннеля, а именно в районах изгиба (поворота) туннеля в условиях повышенной турбулентности. В середине туннеля отмечено резкое снижение биомассы обрастания и ее нарастание на стальном субстрате в конце, что можно объяснить сужением просвета, повышенной турбулентностью потока на данном участке и меньшим заилением. Поперечное сечение стальной трубы на 25 % меньше, чем бетонного туннеля. Именно в районах перехода отмечена наибольшая разница количественных показателей сообщества обрастания.

Характер пространственного распределения организмов обрастания на внутренней стороне туннеля связан с особенностями движения воды, которые являются одним из основных факторов, обуславливающих распределение животных на естественных и антропогенных субстратах [8]. Особую роль в этом отношении играют микровихревые движения, так называемая микромасштабная турбулентность. Хотя водозаборный туннель ВТЭЦ-2 имеет довольно простую геометрию, движение воды в нем происходит по достаточно сложной схеме с образованием областей локальной концентрации касательных напряжений, водоворотных зон и поперечных циркуляций с созданием штопорообразного движения, что хорошо проиллюстрировано на рисунке-схеме в монографии [8].

В результате более точной оценки количественных показателей макрообрастания водозаборного туннеля с применением лазерного дальномера показана более высокая степень обрастания туннеля в 2015 г. по сравнению с исследованием 2001 г. В то время как в 2001 г. находки устриц в обрастании туннеля были лишь единичными, в 2015 г. сообщество обрастания представляет сплошное поселение гигантской устрицы. Данное сообщество плохо поддается физическим методам очистки, так как устрицы более устойчивы к повышению температуры воды и бескислородным условиям абиотической среды. Особую опасность для техноэкосистемы туннеля представляет собой климаксное сообщество двустворчатых моллюсков с участием мидии тихоокеанской,

если их оторвать, может быть нарушена стабильная работа системы охлаждения. На момент проведения работ в 2015 г. опасность попадания створок мидий и устриц в конденсаторные трубки была достаточно высокой. С учетом мощности потока в туннеле ВТЭЦ-2 створки мидий могут беспрепятственно отрываться, эта вероятность увеличивается по мере роста моллюсков.

Результаты исследований в 2015 г. свидетельствуют о недостаточной эффективности регулярной термообработки туннелей электростанции. Даже если уничтожение столь мощного обрастания будет проведено путем термообработки, накопление массы мертвых остатков (раковин моллюсков и усонюгих раков и известковых домиков трубчатых червей) может привести к увеличению шероховатости поверхности, а также способствовать повторному заселению обрастателей.

Для минимизации рисков биоповреждения системы охлаждения электростанции в результате засорения организмами обрастания необходима разработка комплексной стратегии, сочетающей физические методы защиты и другие технологические приемы. К ним относится возможность применения полностью экологически безопасных современных методов – самополирующихся противообрастающих покрытий [9]. Эффективность таких покрытий обусловлена тем, что адгезия между обрастателем и поверхностью сведена к минимуму из-за низкой поверхностной энергии и модуля упругости. Также может применяться метод импульсной подачи 35 %-ной перекиси водорода и солей железа [6] либо озонирования воды в период массового оседания моллюсков. Данный метод может быть легко автоматизирован и применен без участия человека.

Следует упомянуть о недавней разработке наземного стенда – установки регулируемого потока воды, которую можно использовать для испытания и проверки свойств защитных покрытий на тестируемых субстратах, включая противообрастающие и антикоррозийные покрытия [10]. В качестве экологически безопасных методов борьбы с биообрастанием эксплуатируемых в водной среде конструкций могут применяться полуавтономные роботы для лазерной технологии очистки поверхностей, разработкой которых в настоящее время занимаются сотрудники ИАПУ ДВО РАН³⁾ [11, 12]. Роботизированный комплекс лазерной очистки подводных поверхностей судов и морских сооружений, позволяющий удалять биообрастание, может быть использован и при очистке водозаборов ТЭЦ от биообрастания [13, 14]. Кроме того, в настоящее время китайские специалисты внедряют в практику борьбы с мидиевым обрастанием ударно-волновой метод, дающий хороший противообрастающий эффект на поверхностях системы охлаждения [15].

Одновременно с применением противообрастающих покрытий необходима корректировка эксплуатационного режима электростанции в сезон интенсивного оседания организмов макрообрастания с мая по сентябрь. Она заключается в непрерывной эксплуатации каждого туннеля системы охлаждения не более двух месяцев в течение указанного сезона с последующей остановкой и осушением на одну – две недели для уничтожения макрообрастания

³⁾ Кульчин Ю. Н. Развитие исследований в области лазерных технологий и их практических применений на Дальнем Востоке России // Лазер-Информ. 2020. № 10. С. 1–11.

на стадии начала формирования сообщества. Данный прием сможет заменить дорогостоящую термообработку, хотя он может с ней и сочетаться для сокращения периода простоя туннеля ТЭЦ. В холодный период года возможно продолжение подобной практики, но уже без термообработки.

Заключение

Впервые проведена количественная съемка макрообрастания подземного водозаборного туннеля ВТЭЦ-2 с применением лазерных технологий. Установлено, что на всей внутренней поверхности туннеля присутствует сообщество макрообрастания преимущественно с очаговым распределением. В составе обрастания туннеля обнаружен 91 вид беспозвоночных, принадлежащих к различным таксономическим группам. Среди них доминантами по плотности являлись представители ракообразных из отряда Amphipoda, по биомассе – двустворчатые моллюски *Mytilus trossulus* и *Magallana gigas*. Установлено максимальное развитие макрообрастания в нижней части водозаборного туннеля с количественным преобладанием *M. trossulus*. В то же время в верхней части водозабора отмечено количественное преобладание прикрепленных многощетинковых червей с твердым известковым домиком.

Показана более высокая степень обрастания туннеля в 2015 г. по сравнению с 2001 г., установлены различия видового состава и количественных показателей. В условиях повышенной турбулентности в районе изгиба стальной трубы наблюдались основные скопления фонообразующих видов макрообрастания. На стальных участках водовода зарегистрирована наибольшая биомасса твердых отложений, в то время как на его бетонных участках количественно преобладали илестые биоотложения.

Отмечена существенная разница в количественных показателях общей сырой биомассы макрообрастания туннеля и биомассы макрообрастателей (отношение этих величин составляет от 35 до 50 раз). На основании полученных результатов даны рекомендации по разработке экологически безопасных физических методов защиты системы охлаждения электростанций от морского обрастания в сочетании с другими технологическими приемами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Diatom to dinoflagellate shift in the summer phytoplankton community in a bay impacted by nuclear power plant thermal effluent / T. Li [et al.] // Marine Ecology Progress Series. 2011. Vol. 424. P. 75–85. <https://doi.org/10.3354/meps08974>
2. Thermal impacts of a coal power plant on the plankton in an open coastal water environment / K. H. Choi [et al.] // Journal of Marine Science and Technology. 2012. Vol. 20, iss. 2. P. 187–194. <https://doi.org/10.51400/2709-6998.1837>
3. Nuclear power plant technoecosystem: 18 years of hydrobiological observations / A. A. Protasov [et al.] // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2017. Vol. 10, iss. 4. P. 459–484. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0045>
4. Lethal and sub-lethal effects of chlorination on green mussel *Perna viridis* in the context of biofouling control in a power plant cooling water system / M. Gunasingh [et al.] // Marine Environmental Research. 2002. Vol. 53, iss. 1. P. 65–76. [https://doi.org/10.1016/s0141-1136\(01\)00110-6](https://doi.org/10.1016/s0141-1136(01)00110-6)

5. Venkatesan R., Murthy P. S. Macrofouling Control in Power Plants // Marine and Industrial Biofouling / Edited by H. C. Flemming [et al.]. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2008. P. 435–446. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69796-1_14
6. Звягинцев А. Ю., Полтаруха О. П., Масленников С. И. Обрастание морских систем технического водоснабжения и анализ методов защиты от обрастания в водоводах (аналитический обзор) // Вода: химия и экология. 2015. № 1. С. 30–51. EDN TWNISJ.
7. Begun A. A., Maslennikov S. I. Influence of the technical ecosystem of the electric power plant (Vladivostok) on the phytoplankton of the Japanese Sea // Water Resources. 2021. Vol. 48, iss. 3. P. 404–412. <https://doi.org/10.1134/S0097807821030052>
8. Звягинцев А. Ю., Моценко А. В. Морские техноэкосистемы энергетических станций. Владивосток : Дальнаука, 2010. 343 с.
9. Non-toxic, non-biocide-release antifouling coatings based on molecular structure design for marine applications / A. G. Nurioglu [et al.] // Journal of Materials Chemistry B. 2015. Iss. 32. P. 6547–6570. <https://doi.org/10.1039/C5TB00232J>
10. Исследование формирования сообществ обрастания в условиях установки регулируемого потока воды / А. Ю. Звягинцев [и др.] // Морской биологический журнал. 2021. Т. 6, № 1. С. 17–33. EDN WKVTRU. <https://doi.org/10.21072/mbj.2021.06.1.02>
11. Перспективы и технико-экономические аспекты разработки новых методов контроля биообрастания на морском транспорте / Ю. Н. Кульчин [и др.] // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2015. № 6. С. 96–102. EDN VMAZSX.
12. Перспективы промышленных применений лазерной очистки материалов / В. П. Вейко [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 3. С. 50–54. EDN OYNMUL.
13. Кульчин Ю. Н., Никитин А. И., Субботин Е. П. Лазерная подводная очистка корпусов морских судов // Прикладная фотоника. 2020. Т. 7, № 4. С. 86–101. EDN BJOZR.
14. Богданов Е. В., Будников К. О. Лазерная очистка и защита корпусов судов и кораблей от коррозии // Морской вестник. 2023. № 1. С. 54–56. EDN HQPODP. https://doi.org/10.56192/18123694_2023_1_54
15. Ge H., Wang H., Gao Z. Control of mussel *Mytilus galloprovincialis* Lamarck fouling in water-cooling systems using plasma discharge // Water Science and Technology. 2019. Vol. 80, iss. 6. P. 1125–1133. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.361>

Поступила 19.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 6.05.2024 г.;
принята к публикации 18.09.2024 г.; опубликована 20.12.2024 г.

Об авторах:

Масленников Сергей Иванович, старший научный сотрудник, Национальный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Пальчевского, д. 17), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 9151-6468, ORCID ID: 0000-0003-4776-0624, 721606@mail.ru**

Звягинцев Александр Юрьевич, ведущий научный сотрудник, Национальный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Пальчевского, д. 17), доктор биологических наук, **SPIN-код: 1479-8787, auzvugin@gmail.com**

Бегун Андрей Аркадьевич, научный сотрудник, Национальный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Пальчевского, д. 17), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 4786-6332**, **ORCID ID: 0000-0002-8383-796X**, *andrejbegun@yandex.ru*

Заявленный вклад авторов:

Масленников Сергей Иванович – проведение исследования, проведение критического анализа материалов, связанных с фундаментальной стороной исследования, графическая интерпретация результатов

Звягинцев Александр Юрьевич – разработка концепции, формулировка и постановка задачи исследования, обработка проб макрообрастания, описание результатов исследования, качественный анализ результатов и их интерпретация

Бегун Андрей Аркадьевич – проведение исследования, количественная обработка проб и анализ результатов, редактирование рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.