

УДК 577.472

ДИАТОМОВЫЕ ВОДОРОСЛИ МИКРОПЕРИФИТОНА ВОДОЗАБОРНОГО ТОННЕЛЯ ТЭЦ-2 г. ВЛАДИВОСТОКА¹

© 2025 г. А. А. Бегун^{a, *}, А. Ю. Звягинцев^{a, **}, С. И. Масленников^{a, b, ***}

^aНациональный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского ДВО РАН, Владивосток, 690041 Россия

^bДальневосточный федеральный университет, пос. Аякс Приморского края, о. Русский, 10690922 Россия

*e-mail: andrejbegun@yandex.ru,

**e-mail: ayzyuyagin@gmail.com,

***e-mail: 721606@mail.ru

Поступила в редакцию 03.05.2023 г.

После доработки 01.12.2023 г.

Принята к публикации 27.11.2023 г.

В рамках эксперимента по изучению биоты в условиях морских техноэкосистем впервые исследован видовой состав и количественное обилие диатомового микроперифитона в водозаборном тоннеле Владивостокской ТЭЦ-2. На основании современных методов анализа альгофлоры, включая сканирующую электронную микроскопию, идентифицировано 49 видов микроводорослей из класса Bacillariophyceae. На поверхности макрообрастания водозаборного тоннеля отмечено относительно высокое количественное обилие микроперифитона (максимальная плотность $17.4 \pm 2.5 \times 10^6$ кл. см⁻², биомасса 56.3 ± 9.8 мг·см⁻¹). Доминирующее положение занимали преимущественно бентосные диатомовые водоросли, адаптированные к миксотрофному метаболизму. Количественное обилие диатомового микроперифитона в разных участках водозаборного тоннеля различалось достаточно существенно (в 3–6 раз) и обуславливалось локальными гидродинамическими условиями.

Ключевые слова: ВТЭЦ-2, техноэкосистема, водозаборный тоннель, диатомовые водоросли, микроперифитон.

DOI: 10.31857/S0321059625030123 **EDN:** SYFFVM

ВВЕДЕНИЕ

Сообщества гидробионтов водоемов-охлаждателей энергетических станций — причина ряда биологических помех в работе оборудования, среди которых особое место занимают системы охлаждения промышленных предприятий. Сообщество микроперифитона, состоящее преимущественно из бентосных диатомовых водорослей, является важнейшим автотрофным компонентом морского обрастания и оперативным индикатором изменения абиотических условий среды. Наряду с бактериями, диатомовые водоросли выполняют функцию первичного органического субстрата для формирования морского обрастания, отличаются нетребовательностью к световому и температурному режиму и способны выживать в экстремальных условиях среды.

При изучении водозаборов энергетических станций основное внимание уделялось исследованиям видовой состава и структуры сообществ фитопланктона [16, 17, 22]. Достаточно хорошо исследован микроперифитон в техноэкосистемах водозаборов тепловых и атомных электростанций, расположенных на континентальных водоемах с замкнутым типом охлаждения [8, 10]. В то же время микроперифитон в системах охлаждения морских электростанций с проточным типом охлаждения остается на сегодняшний день почти неисследованным. Известна лишь одна работа [29], посвященная противоположным технологиям в системах водяного охлаждения некоторых морских электростанций Японии, в которой, наряду с макрообрастанием, анализировался состав бактериально-диатомовой пленки.

В 2001–2002 г. научным коллективом Института биологии моря ДВО РАН был организован эксперимент по изучению трансформации морской биоты под воздействием техноэкосисте-

¹ Исследование выполнено в рамках государственного задания № 124021900009-6 и при частичной финансовой поддержке Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (проект 169-15-2023-002)

мы Владивостокской ТЭЦ-2 (далее – ВТЭЦ-2), связанной с водами бух. Сухопутной Японского моря. В результате была показана специфика видового и количественного развития различных групп гидробионтов, а также установлено нахождение новых видов-вселенцев на разных стадиях натурализации [5, 7]. Позднее были выявлены изменения количественной структуры фитопланктона при кратковременном прохождении через систему водоохлаждения ВТЭЦ-2, что выражалось в специфике видового состава и аномальном удлинении вегетационного сезона [14].

Одновременно с этим была начата разработка новых методов защиты от обрастания водозаборного тоннеля. Вызвано это неэффективностью проводимой ежегодно термообработкой тоннелей и необходимостью проводить механическую очистку от обрастания во время их осушки. Эти обстоятельства вызвали фундаментальный интерес исследовать микроперифитон в водозаборном тоннеле ВТЭЦ-2 как в специфическом биотопе с отсутствием солнечного света, активной гидродинамикой, а также регулярно проводимой термообработкой и механической очисткой поверхности тоннеля от макрообрастания.

Цель работы заключалась в изучении видового состава и количественного обилия диатомовых водорослей микроперифитона в условиях водозаборного тоннеля ВТЭЦ-2.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Водозаборный тоннель ВТЭЦ-2 начинается в водозаборном ковше, сообщаемся с бух. Сухопутной Уссурийского залива Японского моря, состоит из стальной трубы длиной 250 м, бетонного тоннеля длиной 970 м и заканчивается стальной трубой возле насосной станции ВТЭЦ-2 (рис. 1). Вода на электростанцию подается с помощью насосов. Входные отверстия в тоннеле станции защищены решеткой грубой очистки. При работе насосов вода нагревается и сбрасывается в локальную систему охлаждения обратно в водозаборный ковш. Вода в нем на 2–3°С выше фоновой, в результате чего в холодный период год от года происходит смещение сроков формирования ледостава в зависимости от погодных условий [14].

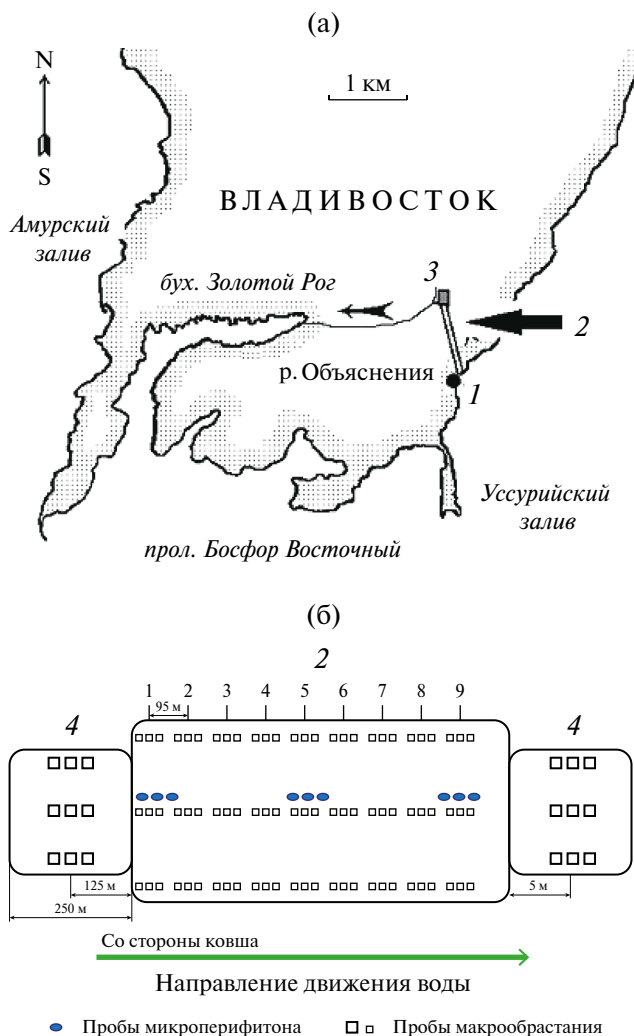


Рис. 1. а – картосхема района исследования, б – план-схема маршрута отбора проб в водозаборном тоннеле ВТЭЦ-2; 1 – водозабор, 2 – бетонный тоннель, 3 – система охлаждения электростанции, 4 – стальная труба.

Несмотря на достаточно простую геометрию водозаборного тоннеля ВТЭЦ-2 (рис. 1), движение воды внутри него происходит по довольно сложной схеме с образованием областей локальной концентрации касательных напряжений, водоворотных зон и поперечных циркуляций [7]. Сразу после выхода из стальной трубы, по которой вода подается в бетонный тоннель, струя постепенно расширяется на участке, соответствующем примерно его десяти диаметрам. В процессе расширения происходит формирование мощных кольцевых вихрей, охватывающих струю воды. Водоворотные зоны в зависимости от скорости потока могут простираться вниз по течению на

расстояние 40–50 диаметров тоннеля (80–100 м), что как раз соответствует начальной точке исследования перифитона. Далее, по мере движения воды к середине бетонной трубы и затем – к ее концу, гидростатическое давление значительно снижается, что способствует снижению влияния водоворотных зон на стенки тоннеля [7].

В тоннели охлаждения электростанции вода подается через фильтры, представляющие собой 4 вращающиеся стальные сетки с ячейкой диаметром 3 мм. Скорость потока в тоннелях системы охлаждения электростанции составляет 2 м/с [14], цикл прохождения ~2 мин. Вода, температура которой за это время повышается на 5–6°C, сбрасывается в р. Объяснения, и далее – в бух. Золотой Рог. Соленость отработанных вод колеблется в пределах 23.4–35.0‰, среднемесячная температура – 23.7°C. В зимний период с момента пуска ВТЭЦ-2 температура воды в

бух. Золотой Рог не опускается ниже 0°C и бухта не замерзает [7].

Пробы диатомового микроперифитона отбирали 5 мая 2015 г. с поверхности макрообрастания водозаборного тоннеля скребком с длиной лезвия 10 см с площадки (10×10 см) с трех участков, соответствующих началу, середине и концу тоннеля. Замер пройденного расстояния осуществлялся лазерным дальномером “Leica DISTO A8” (рис. 2). Для оценки статистической достоверности данных было отобрано по 3 пробы перифитона с каждого исследуемого участка. Расстояние между исследуемыми участками бетонного тоннеля составляло 380 м.

Камеральную и микроскопическую обработку материала проводили согласно методикам, описанным в монографии [11]. Соскобы микроперифитона промывали морской филь-



Рис. 2. а, б – процесс пробоотбора микроперифитона в бетонном тоннеле ВТЭЦ-2 на участке с мощным мидиевым обрастанием, в – приближенный фрагмент мидиевого обрастания на поверхности тоннеля, г – лазерный дальномер “Leica DISTO A8” на фоне макрообрастания.

трованной водой и сливали в специальные емкости. Полученные суспензии со смывами микроводорослей пропускали через капроновые фильтры “Nitex” (“Sefar”, Швейцария) с диаметром пор 20 микрон. Фракции этих смывов концентрировали методом осаждения до 4–5 мл. Для идентификации некоторых видов диатомей были использованы постоянные препараты и традиционные методы очистки панцирей, изготовленные по общепринятой методике [6] с применением “горячего” способа обработки (концентрированная серная кислота) и высокопреломляющей среды (канадский бальзам). При идентификации микроводорослей использовался световой микроскоп проходящего света “Olympus BX41”, объектив UPLanF1 100×/1/.30 (Япония). Видовой состав диатомовых водорослей уточнялся с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) “Sigma 300 VP” (Великобритания).

Подсчет клеток выполняли в камере “Сэдвик-Рафтер” (Sedgewick Rafter Counting cells) объемом 1 мл, плотность микроводорослей рассчитывали на один квадратный сантиметр поверхности субстрата (кл. см⁻²), биомассу – в миллиграммах на один квадратный сантиметр (мг см⁻²). Биомассу микроводорослей вычисляли объемным методом, используя собственные и литературные данные измерений объема клеток каждого вида, считая удельный вес диатомовых водорослей равным 1.2 мг мл⁻¹ [11]. Таксоны микроводорослей приведены в соответствии с международным интернет-ресурсом AlgaeBase в 2023 г. [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе пробоотбора было установлено, что на всей внутренней поверхности водозаборного тоннеля ВТЭЦ-2 присутствует достаточно мощное сообщество макрообрастания с мозаичным характером распределения. Макрообрастание водозаборного тоннеля состояло преимущественно из мидии тихоокеанской *Mytilus trossulus* A. Gould, 1850 и устрицы гигантской *Magallana gigas* (Thunberg, 1793) (рис. 2). Максимального развития макрообрастание достигало в нижней части тоннеля, где доминировала тихоокеанская мидия. В верхней части тоннеля

как по биомассе, так и по плотности преобладали многощетинковые черви.

В микроперифитоне водозаборного тоннеля ВТЭЦ-2 зарегистрировано 49 видов и внутривидовых таксонов микроводорослей из класса Bacillariophyceae. Максимальное видовое богатство микроводорослей отмечено в начале тоннеля (48), минимальное – в середине (36), в конце – 40. По отношению к биотопу 7% всех видов являются планктонными, живущими в пелагиали, 23% – бенто-планктонными (тихопелагическими), способными обитать как в пелагиали, так и в бентали, и 70% – бентосными, связанными жизненным циклом с твердым или рыхлым субстратом. Среди них представлены как одиночноживущие (28 видов), так и колониальные (21) формы, как подвижные (35), так и прикрепленные (14). По отношению к солености воды в микроперифитоне преобладают эвригалитные виды, из них морские составляют 58%, солоноватоводно-морские – 30%, пресноводно-солоноватоводные – 12%. По отношению к рН среды все виды – алкалифилы. К типичным эпифитам и обрастателям твердых субстратов относятся 10 видов диатомовых водорослей, а 23 принадлежат к флоре песчаных и илистых грунтов (эпипсаммон и эпипелон), попавших в микроперифитон в период взмучивания вод.

Согласно фитогеографической характеристике, из всех встреченных микроводорослей 44% – космополиты, 14% – бореальные, 19% – тропическо-бореальные, 7% – аркто-бореальные и 16% – аркто-бореально-тропические. К индикаторам органического загрязнения относятся 15 видов, среди них 9 – β-мезосапробионты – индикаторы умеренно загрязненных органикой вод и 6 – α-мезосапробионты – индикаторы значительно загрязненных вод.

Количественный анализ микроперифитона на разных участках водозаборного тоннеля ВТЭЦ-2 показал, что общая плотность и биомасса микроводорослей были наиболее высокими и сравнительно близкими по значимости в середине тоннеля ВТЭЦ-2 ($N = 13.6 \pm 1.5 \times 10^6$ кл. см⁻², $B = 60.4 \pm 12.5$ мг см⁻¹) и в его конце ($N = 17.4 \pm 2.5 \times 10^6$ кл. см⁻², $B = 56.3 \pm 9.8$ мг см⁻¹) (рис. 3). В начале тоннеля количественные показатели

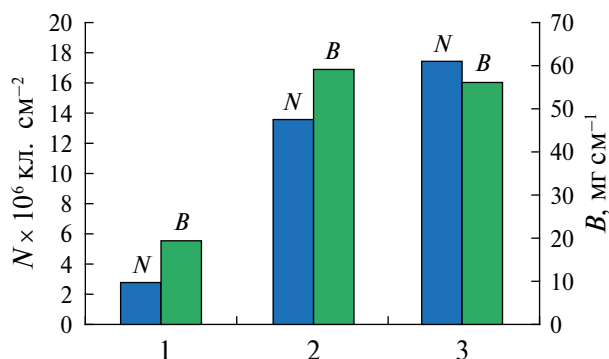


Рис. 3. Распределение общей плотности N и биомассы B в микроперифитоне разных участков водозаборного тоннеля ВТЭЦ-2: 1 – начало тоннеля, 2 – середина, 3 – конец.

были в 3–6 раз ниже ($N = 2.78 \pm 0.5 \times 10^6$ кл. см⁻², $B = 19.6 \pm 3.2$ мг см⁻¹).

Доминирующее положение по плотности на поверхности всех исследованных участков водозаборного тоннеля ВТЭЦ-2 занимала бентосная диатомовая водоросль *Halamphora exigua* (W. Gregory) Levkov, 2009 ($4.07 \pm 2.5 \times 10^6$, $0.34 \pm 2.5 \times 10^6$ и $2.95 \pm 2.5 \times 10^6$ кл. см⁻² соответственно), что составляло 18–26% общей плотности микроперифитона. В число субдоминантов входили диатомовые водоросли *Actinoptychus splendens* (Shadbolt) Ralfs, 1861, *Amphora proteus* W. Gregory, 1857, *Cocconeis stauroneiformis* H. Okuno, 1957, *Fogedia finmarchica* (Cleve & Grunow) Witkiwsky, Metzeltin & Lange-Bertalot, 1997, *Fragilaria striatula* Lyngbe, 1819, *Melosira moniliformis* (O.F. Müller) C. Agardh, 1824, *Melosira moniliformis* (O.F. Müller) C. Agardh, 1824 var. *moniliformis*, *Licmophora abbreviata* C.A. Agardh, 1831, *Navicula amorphila* var. *intermedia* Grunow, 1882, *Tabularia tabulata* (Agardh) Snoeijs, 1992, *Halamphora* spp. и *Nitzschia* spp. (рис. 4).

Среди диатомовых водорослей были встречены виды с морфологическими аномалиями (абберантностями) кремнеземного панциря. Так, у видов *Cocconeis scutellum* Ehrenberg, 1838, *C. stauroneiformis*, *M. moniliformis*, *Licmophora abbreviata*, *Tabularia fasciculata* (C. Agardh) D.M. Williams et Round, 1986 и *Triceratium arcticum* var. *balaena* (Ehrenberg) A. Cleve, 1951 наблюдалась искривление кремнеземного панциря различной формы и интенсивности в виде отдельных во-

гнутостей или разлома всей створки и срастания ребер. Такие абберантные формы встречались в микроперифитоне единично на всех участках бетонного тоннеля.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Видовой состав диатомового микроперифитона оказался достаточно разнообразным и в целом соответствовал литературным данным по микроперифитону прибрежных акваторий зал. Петра Великого Японского моря [11, 15]. Состав доминирующих и субдоминирующих видов микроперифитона бетонного тоннеля ВТЭЦ-2 был сходным с таковым для микроперифитона наиболее загрязненных прибрежных акваторий зал. Петра Великого Японского моря [1, 2], испытывающих высокое загрязнение биогенными элементами в результате влияния хозяйственно-бытовых стоков и нефтепродуктов. Среди отмеченных в водозаборном тоннеле диатомовых водорослей количественно преобладали преимущественно виды-убиквисты с высокими индексами сапробности, толерантные к воздействию неблагоприятных условий среды – нефтяному, химическому и термальному загрязнению. Отмечено два потенциально токсичных вида – планктонный *Pseudo-nitzschia calliantha* Lundholm, Moestrup & Hasle, 1894 и бентосный *Halamphora coffeiformis* (C. Agardh) Levkov, 2009. Эти виды способны продуцировать домоевую кислоту [20] и вызывать у человека амнезийное отравление моллюсками.

Водозаборный ковш, расположенный в бух. Сухопутной Уссурийского залива, не испытывает антропогенного загрязнения вод хозяйственно-бытовыми сточными водами, нефтепродуктами и другими поллютантами, способными оказывать существенное влияние на развитие микроводорослей [14]. Следовательно, высокие количественные показатели видов-индикаторов органического загрязнения в условиях бетонного тоннеля ВТЭЦ-2 можно объяснить поступлением значительного количества биогенов, образующихся в результате экзометаболизма макрообрастания бетонной трубы, что ранее было показано для эпибиозов бух. Золотой Рог [3], а также для микроперифитона аквариального комплекса Приморского океанариума (о. Рус-

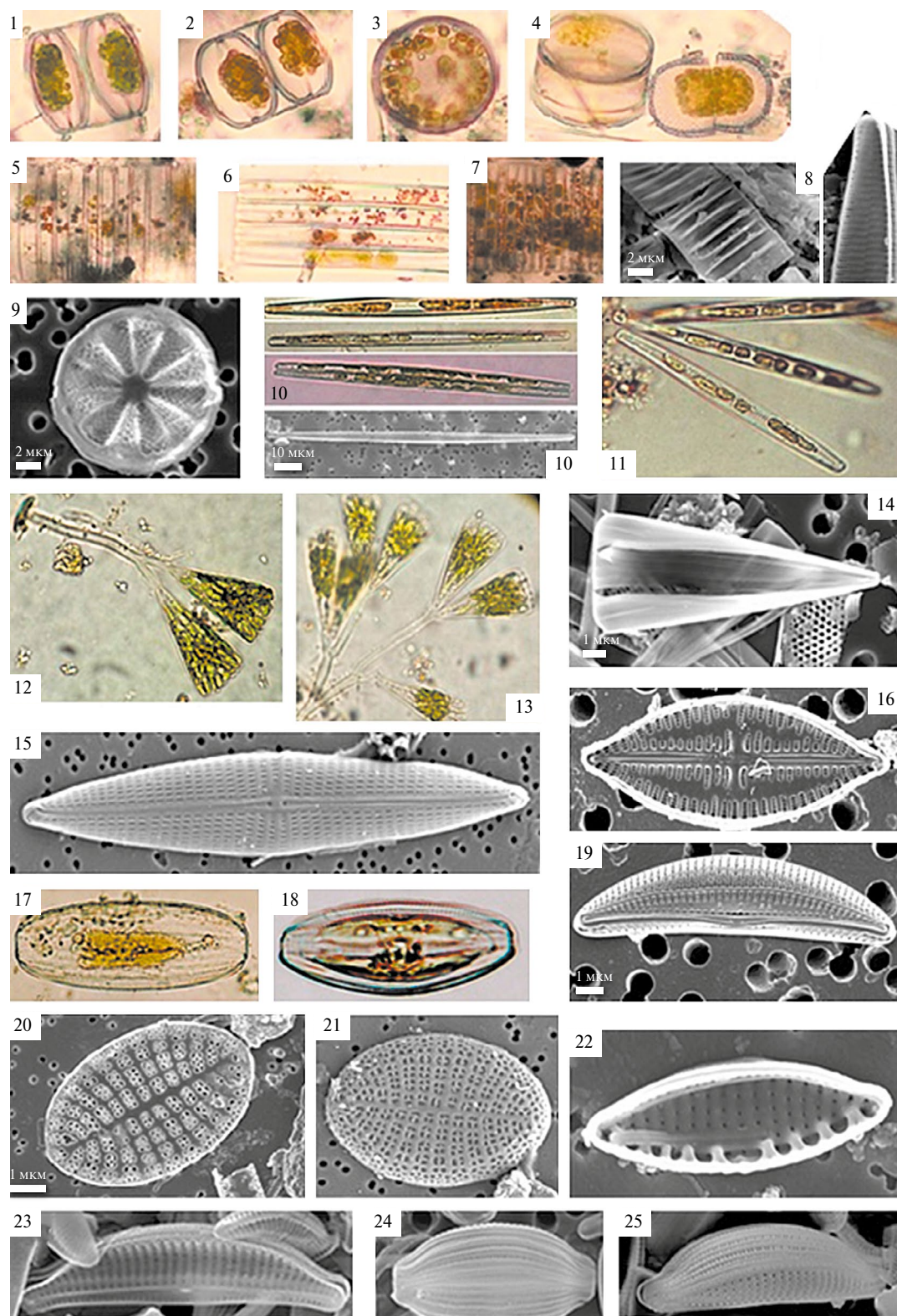


Рис. 4. Общий вид клеток и колоний массовых видов диатомовых водорослей в микроперифитоне водозаборного тоннеля ВТЭЦ-2: 1–4 – *Melosira moniliformis* (СМ); здесь и далее 5–8 – *Fragilaria striatula* (5–7 – СМ, 8 – СЭМ); здесь и далее 9 – *Actinopterychus splendens* (СЭМ); здесь и далее 10, 11 – *Tabularia tabulata* (СМ) var. *moniliformis*; здесь и далее 12–14 – *Licmophora abbreviata* (12, 13 – СМ, 14 – СЭМ); здесь и далее 15 – *Navicula ammophila* var. *intermedia* (СЭМ); здесь и далее 16 – *Fogedia finmarchica* (СЭМ); здесь и далее 17–19 – *Amphora proteus* (17, 18 – СМ, 19 – СЭМ); здесь и далее 20, 21 – *Cocconeis stauroneiformis* (СЭМ); здесь и далее 22 – *Nitzschia* sp. (СЭМ); здесь и далее 23–25 – *Halamphora exigua* (СЭМ).

ский, г. Владивосток) в местах содержания морских млекопитающих [4], а также для ряда марикультурных хозяйств с культивируемыми моллюсками [11, 12].

Диатомовые водоросли, развивающиеся на поверхности мидий, по способу питания в основном – миксотрофы, питающиеся за счет экзометаболитов моллюсков, в частности, неорганических соединений азота и фосфора в форме PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- и NO_2^- [3]. Экспериментальными исследованиями показано [24, 25], что в присутствии в воде биогенных элементов при недостатке солнечного света некоторые микроводоросли, снижая метаболическую активность, способны переходить от автотрофного способа энергообеспечения к миксотрофному. Такой переход возник у диатомовых водорослей как адаптационный механизм, связанный с невозможностью фотосинтеза при недостатке освещенности [30].

Среди видов, способных к миксотрофному питанию, в микроперифитоне всех исследованных участков водозаборного тоннеля ВТЭЦ–2 по плотности доминировала диатомовая водоросль *H. exigua* (рис. 4), характерная для грунтовых биотопов и обрастаний прибрежных морских акваторий [27, 28]. Кроме того, отмечались высокое количественное развитие мелкоклеточных диатомовых водорослей *Nitzschia* spp. и *Halamphora* spp., способных к миксотрофии [11, 12].

Существенную роль в распределении организмов на поверхности водозаборов играют микровихревые движения воды, регулярно проникающие в более вязкий подслои пограничного слоя воды [10]. Наблюдаемое снижение (в 3–6 раз) количественных показателей микроперифитона в начальной части бетонного тоннеля ВТЭЦ–2, по сравнению с его серединой и конечной частями, определяется преимущественно влиянием более высокого гидростатического давления воды. Исследование организмов макрообрастания, проведенное ранее в бетонном тоннеле ВТЭЦ–2, показало мозаичный характер распределения доминирующих видов на разных участках тоннеля в зависимости от гидродинамических условий.

Большинство встреченных бентосных диатомовых водорослей имеет различные органы прикрепления к поверхности субстрата (слизистые колонии, трубки, “ножки” из мукополисахаридного матрикса и пр.) [13]. Их способность прикрепления к субстрату во многом зависит от гидродинамических условий водной среды, формирующихся во время процесса водозабора в системе охлаждения электростанций [11]. Следовательно, мощные вихревые потоки на начальном участке водозаборного тоннеля ВТЭЦ–2, формирующиеся под действием высокого гидростатического давления, оказывали негативное воздействие на оседание и прикрепление наименее устойчивых видов диатомовых водорослей.

Анализируя потенциальное влияние других факторов на количественное развитие микроперифитона в системах охлаждения электростанций, следует отметить химическое и термальное загрязнение. Так, ранее отмечалось угнетение физиологической активности микроводорослей, в большей степени связанное с хлорированием воды и ее химической обработкой биоцидами и другими биотическими ингибиторами [21, 26]. Также регистрировался синергетический эффект хлорирования воды и термального стресса в развитии микроводорослей [23]. Однако достоверно известно, что ВТЭЦ–2 такую систему обработки воды не использует [7, 14]. В результате микроперифитон водозаборного тоннеля не испытывает существенного угнетения фотосинтеза, что иллюстрирует достаточно высокое видовое и количественное обилие диатомовых водорослей.

Термальное загрязнение в системе охлаждения ВТЭЦ–2 в результате охлаждения турбин и в ходе работы насосной станции в водозаборном ковше также не могло серьезным образом влиять на количественное обилие микроперифитона. Это связано с тем, что среднегодовое превышение температуры сбросных вод электростанции над температурой в близлежащих бухтах, составляет 5–6°C [7, 14]. В то же время, согласно данным [16, 22], критический для большинства микроводорослей диапазон температуры воды, при котором происходит ослабление их фотосинтетической активности, влияющей на сокращение количественного обилия видов, находится в пределах 25–35°C.

Таким образом, техноэкосистему водозаборного тоннеля ВТЭЦ-2 можно рассматривать как специфический морской биотоп, в котором сформировалось достаточно развитое сообщество микроперифитона на поверхности макрообрастания. Это свидетельствует о том, что используемые в настоящее время физические методы защиты тоннеля от морского обрастания малоэффективны и необходимы разработка и внедрение экологически чистых химических или принципиально новых методов защиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые исследованы видовой состав и количественное обилие диатомового микроперифитона в водозаборном тоннеле ВТЭЦ-2 г. Владивостока в рамках эксперимента по изучению биоты в условиях морских техноэкосистем и разработки методов защиты от обрастания. Отмечено 49 видов микроводорослей класса Bacillariophyceae. Микроперифитон характеризовался сравнительно высокими количественными показателями с максимумом в конечной части тоннеля (плотность $17.4 \pm 2.5 \times 10^6$ кл. см^{-2} , биомасса 56.3 ± 9.8 мг см^{-1}). Показано, что на поверхности макрообрастания водозаборного тоннеля существует достаточно развитое в видовом и количественном отношении сообщество микроперифитона, состоящее преимущественно из бентосных диатомовых водорослей, адаптированных к миксотрофному метаболизму. Количественное обилие диатомового микроперифитона на разных участках водозаборного тоннеля различалось достаточно существенно (в 3–6 раз) и обуславливалось локальными гидродинамическими условиями.

Авторы выражают благодарность ЦКП РК “Морской биобанк” ННЦМБ ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бегун А.А., Звягинцев А.Ю.* Биоиндикация качества морской среды по диатомовым водорослям в обрастании антропогенных субстратов // Изв. ТИНРО. 2010. Т. 161. С. 199–211.
2. *Бегун А.А., Звягинцев А.Ю.* Диатомовые водоросли перифитона акваторий, прилегающих к Дальневосточному морскому государственному природному биосферному заповеднику // Изв. ТИНРО. 2013. Т. 174. С. 1–13.
3. *Бегун А.А., Звягинцев А.Ю., Емельянов А.А.* Микроводоросли перифитона в условиях аквариального комплекса Приморского океанариума ДВО РАН (г. Владивостока, о. Русский) // Вода: химия и экология. 2016. № 3. С. 42–52.
4. *Бегун А.А., Звягинцев А.Ю., Мощенко А.В.* Состав, обилие и динамика диатомовых водорослей эписпоров в прибрежных водах некоторых акваторий залива Петра Великого Японского моря // Изв. ТИНРО. 2011. Т. 164. С. 229–257.
5. *Белозурова Л.С., Звягинцев А.Ю.* Динамика мейо- и макрофауны обрастания в условиях хронического антропогенного загрязнения (бухта Золотой Рог, Японское море) // Изв. ТИНРО. 2006. Т. 144. С. 331–350.
6. Диатомовые водоросли СССР. Ископаемые и современные. Т. 1. Л.: Наука, 1974. 400 с.
7. *Звягинцев А.Ю., Мощенко А.В.* Морские техноэкосистемы энергетических станций. Владивосток: Дальнаука, 2010. 343 с.
8. *Новоселова Т.Н., Протасов А.А.* Фитопланктон водоемов-охладителей техно-экосистем атомных и тепловых электростанций (Обзор) // Гидробиол. журн. 2014. Т. 50. № 6. С. 40–59.
9. *Поспелова Н.В., Балычева Д.С., Рябушко Л.И.* Микроводоросли в спектре питания культивируемых мидий (Крым, Черное море) // Тр. V Международ. науч.-практ. конф. “Морские исследования и образование (MARESEDU–2016)”. М.: Феория, 2016. С. 434–438.
10. *Протасов А.А., Силаева А.А., Ярмошенко Л.П. и др.* Гидробиологические исследования техноэкосистемы Запорожской АЭС // Гидробиол. журн. 2013. Т. 49. № 2. С. 78–94.
11. *Рябушко Л.И., Бегун А.А.* Диатомовые водоросли микрофитобентоса Японского моря. Т. 1. Севастополь; Симферополь: Н. Оріанда, 2015. 288 с.
12. *Рябушко Л.И., Поспелова Н.В., Балычева Д.С., Ковригина Н.П., Троценко О.А., Капранов С.В.* Микроводоросли эпизоона культивируемого моллюска *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819, фитопланктон и гидролого-гидрохимические характеристики акватории мидийно-устричной фермы (Севастополь, Черное море) // Морской биол. журн. 2017. Т. 2. № 4. С. 67–83.
13. *Сапожников Ф.В.* Колониальные диатомеи – спутники моллюсков-фильтраторов // Экология моря. 2003. Вып. 64. С. 309–312.

14. *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 Resour.* 2021. V. 48. № 3. P. 404–412.
15. *Begun A.A., Ryabushko L.I., Zvyagintsev A.Yu.* Bacillariophyta of Periphyton of Navigation Buoys in the Posiet Bay Area (the Sea of Japan, Russia) // *Int. J. Algae.* 2015. V. 17. № 1. P. 23–37.
16. *Choi K.H., Kim Y.O., Lee J.B., Wang S.Y., Lee M.W., Lee P.G., Ahn D.S., Hong J.S.* Thermal impacts of a coal power plant on the plankton in an open coastal water environment // *J. Marine Sci. Technol.* 2012. V. 20 P. 187–194.
17. *Guiry M.D., Guiry G.M.* AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2015. <http://www.algaebase.org>. (дата обращения: 12.04.2023)
18. *Jiang Z.B., Zeng J.N., Chen Q.Z., Liao Y.B., Shou L., Xu X.Q., Liu J.J., Huang Y.J.* Dynamic change of phytoplankton cell density after thermal shock and chlorination in a subtropical bay in China // *J. Plant Ecol.* 2008. V. 32. P. 1386–1396.
19. *Komárek J., Anagnostidis K.* Cyanoprokaryota. 2. Teil: Oscillatoriales // *Süßwasserflora von Mitteleuropa.* 19/2. Heidelberg: Elsevier-Spektrum, 2005. 759 p.
20. *Lelong A., Hegaret H., Soudant P., Bates S.S.* *Pseudo-nitzschia* (Bacillariophyceae) species, domoic acid and amnesic shellfish poisoning: revisiting previous paradigms // *Phycologia.* 2012. V. 51. P. 168–216.
21. *Liu S., Huang H., Huang L.M. et al.* Ecological response of phytoplankton to the operation of Daya Bay nuclear power station // *Chinese J. Mar. Environ. Sci.* 2006. V. 25. P. 9–12.
22. *Lo W.T., Hwang J.J., Hsu P.K., Hsieh H.Y., Tu Y.Y., Fang T.H., Hwang J.S.* Seasonal and spatial distribution of phytoplankton in the waters off nuclear power plants, north of Taiwan // *J. Marine Sci. Technol.* 2004. V. 12. P. 372–379.
23. *Ma Z.L., Gao K.S., Li W. et al.* Impacts of chlorination and heat shocks on growth, pigments and photosynthesis of *Phaeodactylum tricornutum* (Bacillariophyceae) // *J. Experimental Mar. Biol. Ecol.* 2011. V. 397. P. 214–219.
24. *Mitra A., Flynn K.J., Burkholder M. et al.* The role of mixotrophic protists in the biological carbon pump // *Biogeosci.* 2014. V. 11. P. 995–1005.
25. *Moorthi S., Caron D.A., Gast R.J., Sanders R.W.* Mixotrophy: a widespread and important ecological strategy for plankton and sea-ice nanoflagellates in the Ross Sea, Antarctica // *Aquat. Microb. Ecol.* 2009. V. 54. P. 269–277.
26. *Poornima E.H., Rajadurai M., Rao T.S. et al.* Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton // *J. Thermal Biol.* 2005. V. 30. P. 307–316.
27. *Ryabushko L.I., Lishaev D.N., Kovrigina N.P.* Species Diversity of Epilithon Diatoms and the Quality of the Waters of the Donuzlav Gulf Ecosystem (Crimea, the Black Sea) // *Diversity.* 2019. V. 11. Iss. 7. P. 1–12.
28. *Ryabushko L.I., Miroshnichenko E.A., Blaginnina A.V., Shiroyan A.G., Lishaev D.N.* Diatom and cyanobacteria communities on artificial polymer substrates in the Crimean coastal waters of the Black Sea // *Marine Pollution Bull.* 2021. V. 169. Article no. 112521. 10 p. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112521>
29. *Sakaguchi I.* 2003. An overview of the antifouling technologies in power plant cooling water systems // *Sessile Organisms.* V. 20. № 1. P. 15–19.
30. *Zhang Q.R., Gradinger R., Zhou O.S.* Competition within the marine microalgae over the polar dark period in the Greenland Sea of high Arctic // *Acta Oceanologica Sinica.* 2003. V. 22. P. 233–242.

Diatoms of Microperiphyton of the Water Intake Tunnel of Vladivostok TPP-2

A.A. Begun^{a, *}, A. Yu. Zvyagintsev^a, S.I. Maslennikov^{a, b}

^a*A.V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology FEB RAS, Vladivostok, 690041 Russia*

^b*Far Eastern Federal University, Russkiy Island, Vladivostok, 690922 Russia*

**e-mail: andrejbegun@yandex.ru*

The species composition and quantitative abundance of diatom microperiphyton in the water intake tunnel of Vladivostok Thermal Power Plant-2 (VTPP-2) were studied for the first time as part of an experiment on studying biota in marine technoecosystems. Based on modern methods of algal flora analysis, including scanning electron microscopy (SEM), 49 species of microalgae from the class Bacillariophyceae were identified. A relatively high quantitative abundance of microperiphyton was noted on the surface of the macrofouling of the water intake tunnel (maximum density $17.4 \pm 2.5 \cdot 10^6$ cells \cdot cm⁻², biomass 56.3 ± 9.8 mg \cdot cm⁻¹). The dominant position was occupied mainly by benthic diatoms adapted to mixotrophic metabolism. The quantitative abundance of diatom microperiphyton in different sections of the water intake tunnel varied quite significantly (by 3–6 times) and was determined by local hydrodynamic conditions.

Keywords: VTPP-2, technoecosystem, water intake tunnel, diatoms, microperiphyton.