УДК 556; 57.017; 574.5

© *М.И. Орлова**[1,2], *В.А. Родионов*[1,3]

[1]Санкт-Петербургский научный центр РАН. 199034, Университетская наб., д. 5, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]Зоологический институт РАН. 199034, Университетская наб., д. 1, г. Санкт-Петербург, Россия
[3]Санкт-Петербургское отделение Секции прикладных проблем при Президиуме РАН.
199034, Университетская наб., д. 5 лит. Б, г. Санкт-Петербург, Россия
*E-mail: om@spbrc.nw.ru

БИООБРАСТАНИЕ, МОРСКИЕ И КОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ВОДЫ: ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА, ПЕРСПЕКТИВЫ РЕГИОНАЛЬНЫХ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статья поступила в редакцию 26.10.2020, после доработки 06.11.2020

Обзор подготовлен для планирования междисциплинарных исследований (с позиций океанологии, гидробиологии, экологической и экспериментальной физиологии, материаловедения) по проблеме обрастания в части систематизации знаний и разработки подходов к мониторингу явления; проведения актуальных натурных наблюдений и экспериментов с целью выявления закономерностей формирования сообщества обрастания в условиях разнотипных техногенно трансформированных и искусственных экосистем под влиянием различных факторов.

Дана оценка современного состояния знаний, необходимых для разработки надежных долгосрочных превентивных программ решения проблемы биопомех на примере объекта энергетики, а также перспектив использования обрастателей в качестве объектов биотехнологий, направленных на улучшение качества воды в водоемах антропогенно трансформированных и (или) прилежащих к урбанизированным территориям.

Обзор завершается справочным очерком для разработки модельного проекта целевых НИР и ОКР, которые могут быть реализованы в рамках национальных проектов РФ и программ международного сотрудничества в регионе Балтийского моря.

Ключевые слова: биопомехи, биообрастание, расселительные стадии, преодоление географических барьеров, техногенные трансформации природных экосистем, техноэкосистемы, антропогенные факторы формирования обрастания; предупреждение развития биопомех.

© *M. I. Orlova*[1,2]*, *V. A. Rodionov*[1,3]

[1]St. Petersburg Research Center RAS, 199034, Universitetskaya Emb., 5, St. Petersburg, Russia
[2]Zoological Institute RAS, 199034, Universitetskaya Emb., 1, St. Petersburg, Russia
[3]St. Petersburg Branch of the Section of Applied Problems on the Presidium of the RAS,
199034, Universitetskaya Emb., 5, St. Petersburg, Russia
*E-mail: om@spbrc.nw.ru

BIOFOULING IN MARINE AND INLAND WATERS: THEORY, PRACTICE, PROSPECTS OF REGIONAL INTERDISCIPLINARY RESEARCH

Received 26.10.2020, in final form 06.11.2020

The introductory overview is prepared for the planning interdisciplinary research (from positions of oceanography, hydrobiology, ecological and experimental physiology, materials science) on the problem of biofouling in sense of systematizing the knowledge and development of approaches to monitoring of the phenomenon; carrying out actual natural observations and experiments aimed to reveal patterns of formation of fouling community in conditions of different types of technogenically transformed and artificial ecosystems under impact of diverse driving forces.

The overview evaluates the modern state of knowledge required for implementation long-lasting preventative programs directed to solution of biohazards' problem on the example of an energy asset as well as perspectives in use of fouling organisms as objects of biotechnologies for water quality improvement in transformed or(and) aquatic territories adjacent to urbanized regions.

The communication is finished with background sketch for development of a model project of targeted scientific research and experimental design works expected to be implemented in the frame of the National Projects of the Russian Federation and within international cooperation programs in the Baltic Sea region.

Ссылка для цитирования: *Орлова М.И.*, *Родионов В.А.* Биообрастание, морские и континентальные воды: теория, практика, перспективы региональных междисциплинарных исследований // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 4. С. 121–136. doi: 10.7868/S2073667320040103

For citation: *Orlova M.I.*, *Rodionov V.A.* Biofouling in Marine and Inland Waters: Theory, Practice, Prospects of Regional Interdisciplinary Research. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 4, 121–136. doi: 10.7868/S2073667320040103

Key words: biohazards, dispersal stages, overcoming geographical thresholds, technogenic transformations of the natural ecosystems, technoecosystems, men-mediated forces promoting fouling formation; prevention of fouling formation.

> «Морская буровая платформа “Оушн Рейнджер”, казалось, может противостоять любому разгулу стихий. По расчетам проектировщиков, она должна была выдерживать удары 33-метровых волн и напор ветра 185 км/ч. И все же в феврале 1982 г., во время одного из штормов, платформа опрокинулась и затонула; находившиеся на ней 83 человека погибли. А ведь и высота волн, и скорость ветра были меньше расчетных. Вполне вероятно, что решающим моментом в возрастании сопротивления волновым нагрузкам стало массовое развитие обрастания, что и привело к катастрофе. Снижение скорости судов, связанное с этим явлением, обычно к катастрофам не приводит, но вызывает серьезные экономические потери. А иногда даже имеет стратегическое и геополитическое значение: так, одной из причин поражения в Цусимском сражении называют обрастание днищ кораблей. Стоит отметить также, что поток видов-вселенцев на корпусах судов не подвластен никакой таможенной и карантинной службе».
>
> *Звягинцев А.Ю.* Морское обрастание в северо-западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2005 [1].

1. Введение

Из всего многообразия возможных водных биологических объектов — источников биопомех[1], выделяют непосредственно сами организмы-обрастатели[2] и их поселения, результаты их аномального развития, включая продукты жизнедеятельности [2–4]. Основными объектами, подверженными биообрастанию, являются морские суда, портовые сооружения, водоводы и трубопроводы, теплообменники, системы навигационного оборудования, автономные подводные аппараты, гидротехнические сооружения и др. Большую проблему представляет обрастание внутренних стенок корабельных циркуляционных трасс, систем водяного охлаждения, цистерн различного назначения и другого оборудования, требующих большого объема работ по очистке, дезинфекции и других сопутствующих работ. Общий мировой ущерб от биоповреждения составляет около 50 млрд долларов США в год. Только в США затраты на ликвидацию последствий от обрастания чужеродным понто-каспийским двустворчатым моллюском дрейссеной (*Dreissena polymorpha, D. bugensis*) (в судоходстве, питьевом водоснабжении и энергетике) составляют порядка 3.1 млрд долларов ежегодно и уступают лишь затратам на борьбу с завезенными сорняками и сельскохозяйственными вредителями, новыми для США инфекционными болезнями человека [5].

Частным распространенным видом биопомех является биодеструкция. Наиболее агрессивные биодеструкторы материалов — микроорганизмы: бактерии, грибы, микроводоросли, которые входят в состав сформировавшегося биообрастания как его отдельных компонент, либо формируют самостоятельную разновидность биообрастания — биопленки (см. ниже). Жизнедеятельностью нежелательных микроорганизмов-биодеструкторов обусловлено более 40 % регистрируемых биоповреждений, их агрессивные метаболиты — одна из основных причин биокоррозии.

Обрастание повсеместно: и на дне, и в водной толще [6], распространено в Мировом океане — от полярных до экваториальных широт. В последние десятилетия во внутренних водоемах его развитие тоже стало актуальным в связи с биологическими инвазиями[3] видов недавнего морского происхождения [7–9] (рис. 1).

---

[1] Биопомехи, биодеструкция, биоповреждения — нарушения в работе или разрушение технических объектов, прямо или косвенно связанные с развитием на поверхностях (внутренних или наружных) или вблизи технических объектов поселений живых организмов; биодеструкция, биоповреждения — частный случай биопомех — прямое разрушение конструкций и материалов, связанное с присутствием и жизнедеятельностью живых организмов, к числу организмов-биодеструкторов относятся как микробы, так и многоклеточные организмы.

[2] Биообрастание (обрастание, биологическое обрастание, перифитон, микропленка, биопленка) — жизнь, формирующаяся под влиянием различных движущих сил естественного и техногенного происхождения, на разделе жидкой и твердой фазы. Для обрастания характерны высокое разнообразие жизненных форм микро и макроорганизмов, быстрое формирование и рост на подходящих поверхностях, как на дне (*бенталь водоема*), так и на любых предметах и поверхностях, расположенных в толще воды (*пелагиаль водоема*), на технических поверхностях, в том числе находящихся внутри сооружения, омываемых водой; и достижение в относительно короткие сроки значительной биомассы; воздействия на гидродинамику водных масс (эффект рифа) вследствие такого развития. Обычно обрастание и непосредственно на живых организмах и внутри них.

[3] Биологические инвазии — процесс антропогенного расселения биологических видов — находится в фокусе современных экологических исследований и программ по рациональному использованию природных ресурсов во всем мире [41, 42] и связывается с существованием человеческой цивилизации и «антропогенными» преобразованиями природы. Временной аспект может служить одним из критериев отличия «антропогенных» преобразований от «естественных» — эволюционных или биогеографических изменений. Сами виды, о которых идет речь, называют «вселенцами», «чужеродными», а процесс, в негативном аспекте «биологическим загрязнением».

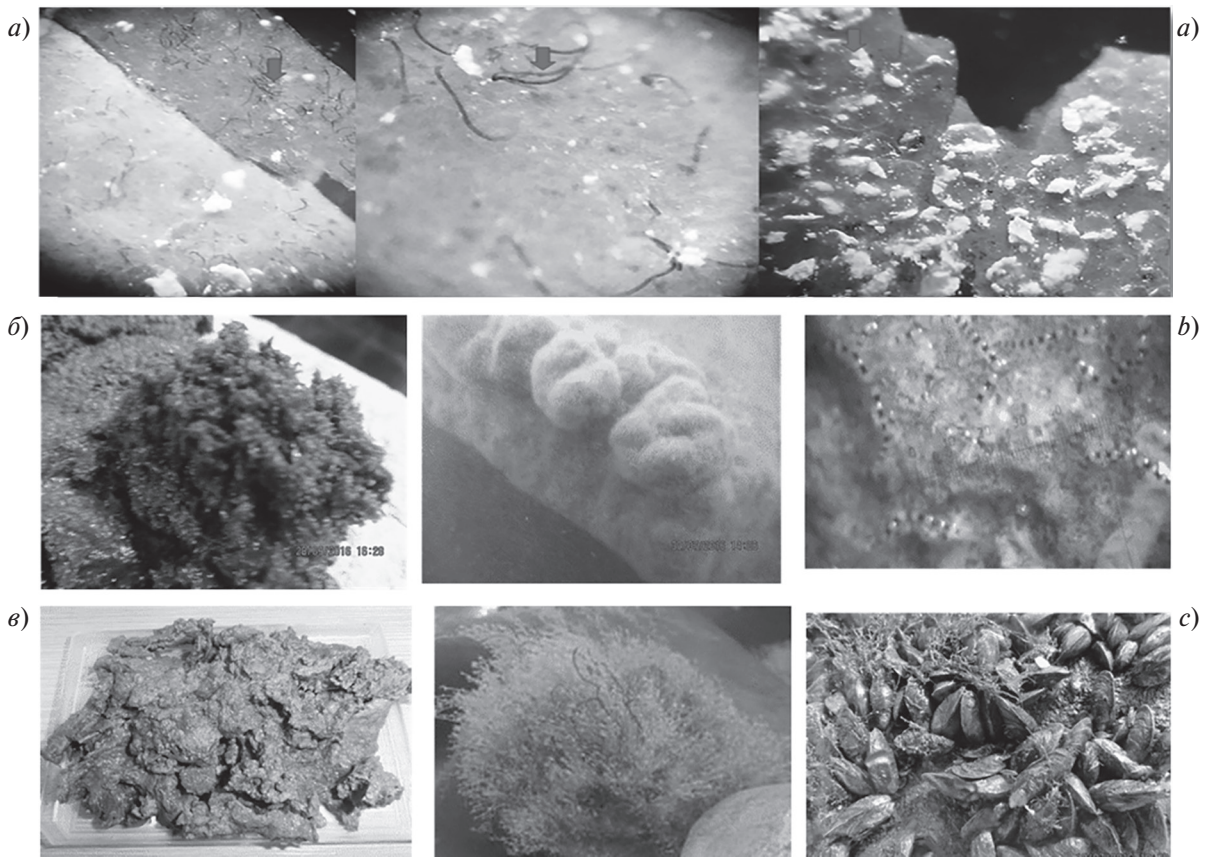


Рис. 1. Разнообразие состава обрастания (*фото авторов*): *а* — проба биопленки, собранная с искусственных поверхностей (ороситель градирни) при различном увеличении бинокулярного микроскопа, на всех трех фотографиях присутствуют нитчатые (трихомы) элементы в структуре, пронизывающих микробиальную часть и матрикс, придающие образованиям зеленоватый оттенок; *б*, *в* — основные группы прикрепленных беспозвоночных животных и других элементов сообществ обрастания в пресных водоемах и в солоноватоводном Финском заливе: *б* — слева-направо: мшанки рода Плюмателла (*Plumatellaemarginata, P. fungosa*) (водоемы-охладители электростанций средней полосы России) и внутрипорошицевые (*Urnatella gracilis*) (Цимлянское водохранилище и отсечной водоем Ростовской АЭС, чужеродный вид), *в* — слева-направо: корковое бактериально-водорослевое обрастание, счищенное с каменистых отсыпок каналов, колониальный гидроидный полип (*Cordylophoracaspia, ч*ужеродный вид), представитель семейства Дрейссенид (*Mytilopsis leucophaeata,* чужеродный вид).

Комментарий: среди приведенных элементов обрастания 50 % чужеродные виды (вселенцы) — *U. gracils, C. caspia, M. leucophaeta* — виды относительно недавнего морского происхождения, имеющие в своем жизненном цикле свободноживущую личинку (рис. 2) — играющую в том числе роль расселительной стадии. Во взрослом состоянии такие виды чаще всего расселяются в составе обрастания, например, судового, на стадии личинки с балластными водами и др. по транс- и внутриконтинентальным маршрутам, преодолевая значительные расстояния и множественные географические и экологические барьеры. Для аборигенных, типично пресноводных видов — *P. emarginata*, *P. fungosa* расселительной (и не менее эффективной, чем личинка, расселительной стадией являются вегетативные почки (рис. 2).

Fig. 1. Diversity of biofouling composition (*photo by authors*). *a* — biofilm sample collected from artificial surface (cooling tower sprinkler) at different magnification of light microscope, at all the tree photos cyanobacterial filaments are present permeating the bacterial part and matrix, greenish tinting the sample; *b*, *c* —some of main groups of sessile invertebrates and other components of fouling communities from inland water-bodies and brackishwater Gulf of Finland: *b* — from the left to the right — bryozoan of *Plumatella* genus (*P. emarginata*, *P. fungosa*) (cooling ponds of power plants, situated in the middle part of Russia Federation), entoproct (*Urnatella gracilis*) (Tsymlyansk reservoir and dammed cooling pond of Rostov power plant (non-indigenous species), *c* — from the left to the right — cork formation consisting of bacteria and algae, removed from stony rocky fill of canal bank, colonial hydrozoan (*Cordylophora caspia,* non-indigenous species), representative of dreissenid family (*Mytilopsis leucophaeata,* non-indigenous species).

Comment: among the elements of fouling presented above the 50 % are non-indigenous species (invaders) — *U. gracils*, *C. caspia*, *M. leucophaeta* — all are of recent marine origin and as so having free-living larvae in their byphasic life cycle (fig. 2); larvae plays including the role of dispersal stage. At adult stage of the life cycle such species and dispersing most often in content of ship hull fouling and as larvae in ballast tanks' water moving along trans- and inland continental shipping routes overcoming multiply geographical and ecological barriers at long distances so far as well as together with currents. Dormant and germinating vegetative bags are typical dispersal stages for aboriginal typically freshwater fouling species — *P. emarginata*, *P. fungosa*; this dispersal stage is even more effective then planktonic larvae (fig. 2).

Практический и научный интерес к биообрастанию — специфической многокомпонентной экологической группировке живых организмов, формирующейся на разделе твердой и жидкой фазы, — определяется прежде всего негативным воздействием его на хозяйственную деятельность человека, но также, как это ни парадоксально, свойствами самих обрастателей, позволяющими рассматривать их как биоресурсные виды [7, 10].

В связи с этим существует необходимость исследования этой группировки не только как явления биологического и экологического, но также как гидрофизического, технического и технологического, в том числе с целью разработки научных основ смягчения последствий и упреждения его развития и, таким образом, обеспечения биобезопасности объектов, использующих природную воду в технологическом цикле. Не менее важны и исследования возможностей его использования как биологического ресурса.

2. Обрастание как неотъемлемый компонент разнотипных природных и техногенных экосистем, следствие глобальных природных и антропогенных процессов

Независимо от географической локализации и приуроченности к тому или иному типу экосистем, ландшафтов и биотопов, биообрастание в различных его проявлениях— это жизнь, формирующаяся под влиянием различных движущих сил естественного и техногенного происхождения, на разделе жидкой и твердой фазы. Местообитания, в которых возможен такой раздел фаз, распространены в природе довольно широко — это и внутренние поверхности живых организмов (человек[4] — не исключение), омываемые биологическими жидкостями [11–12] и значительная часть гидросферы Земли (ниже).

Чаще всего понятие «обрастание» ассоциируется с морскими прибрежными экосистемами. Однако в последние несколько десятилетий проблема обрастания, сопряженная с антропогенным расселением нежелательных видов, становится все актуальнее и для континентальных водоемов, в связи с их колонизацией водными беспозвоночными, имеющими так называемый «морской» жизненный цикл [7, 13] (рис. 1 и 2) со свободно живущей в водной толще (планктонной) личинкой. Наличие такой личинки позволяет организмам, неподвижным во взрослом состоянии, расселяться на личиночной стадии на значительные расстояния и внутри различных сооружений, перемещаясь с потоками воды. Этот феномен во многом связан с деятельностью человека, и его можно расценивать как фактический ответ природы на неконтролируемые антропогенные воздействия на нее. Так протекает этот процесс на фоне, а, скорее всего, и по причине зарегулирования крупных речных бассейнов и их соединения судоходными каналами при создании внутриконтинентальных водных путей как части объединенной глобальной (Мировой) сети водного транспорта, а также в результате гидростроительства и эксплуатации объектов энергетики [14, 15]. Упомянутые виды деятельности приводят, помимо физических видимых изменений водоемов и бассейнов, к появлению в них дополнительных (техногенных) субстратов, пригодных для заселения, и к смене гидрофизического (термического и гидродинамического) режима водоемов в направлении, благоприятном для обрастателей. Так, большинство расселяющихся во внутренних водоемах обрастателей теплолюбивы, экологически пластичны, и, как уже упоминалось, имеют личинок, переносимых потоком воды; по способу питания большинство обрастателей — фильтраторы, то есть питаются тем органическим веществом (живым в составе организмов и неживым (детрит)), что находится во взвешенном состоянии непосредственно в воде [16, 17]. Немаловажную роль играет также и фактическое разрушение таких географических барьеров[5] внутри континента для расселения видов, как водоразделы, за счет создания каналов. Существенно ускоряет процессы

[4] В человеческом организме подвержены обрастанию практически все естественные и искусственные поверхности, находящиеся в нем постоянно или временно, омываемые различными биологическими жидкостями, содержащими исходные компоненты для формирования обрастания (в форме биопленок). Это и формирование микробиальной биопленки в полости рта, способное при своем неконтролируемом развитии приводить к стоматологическим заболеваниям, и кардиологические и неврологические проявления последствий присутствия отложений на стенках сосудов различных участков кровеносной системы. Формируется биопленки и на эндопротезах и имплантах, катетерах и контактных линзах и др. Прослеживаются принципиально те же потребности в знаниях и научно-технических разработках, что и при решении проблемы биопомех вне организма, связанные с созданием безопасных систем защиты поверхности от обрастания и отложений [12], разработкой надежной и адекватной системы мониторинга как самой мишени защитных мероприятий — источника проблемы, так и защищаемого объекта — конкретной системы организма.

[5] Барьер (географический, экологический) для расселения — препятствие, сдерживающее естественную способность биологического вида к экспансии. Примером географического барьера являются водоразделы между речными и морскими бассейнами, стоковые течения в реках, препятствующие заселение вышележащих участков реки. Примером одновременно географического и экологического барьера являются соленые океанические и морские пространства для пресноводных видов и, напротив, пресные и солоноватоводные водоемы для типичных морских видов.

Рис. 2. Расселительные (свободноживущие) и прикрепленные стадии жизненного цикла, остатки беспозвоночных обрастателей — основных источников биопомех на российский электростанциях, расположенных в зоне умеренного климата (из [31]). Верхний ряд — пример жизненного цикла морского типа с пелагической свободноживущей личинкой у двустворчатых моллюсков семейства Дрейссенид. Внизу пример жизненного цикла обрастателя, формирующего в фазе активности колонии и имеющего покоящиеся стадии (вегетативные почки) у мшанки рода Плюмателла.

Fig. 2. Dispersal (free-living) and sessile stages of life cycle of fouling invertebrates, their remnants — major sources for biohazards at Russian Federation power plants in temperate zone (from [31]). Upper row — example of marine life cycle with pelagic (planktonic) free-living larvae of bivalves from dreissenid family. Bottom row — example of life cycle with active colonial (fouling) stage and dormant (vegetative bags) dispersal stage in plumatellid bryozoans.

расселения снятие целой серии экологических барьеров, которое происходит при разнонаправленном перемещении по Мировой транспортной сети современных судов (в т. ч. имеющих балластные цистерны), приводящем, в свою очередь, к стихийному формированию и поддержанию так называемых «инвазионных коридоров»[6], по которым в глобальном масштабе осуществляется перенос видов-обрастателей, имеющих расселительные стадии.

Не составляют исключения и водоемы, расположенные на северо-западе Российской Федерации, в том числе Финский залив, являющийся терминальным водоемом одного из наиболее значимых европейских инвазионных коридоров, соединяющих напрямую Понто-Каспийский регион с Европой, а опосредованно и с Северной Америкой[18]. В Финском заливе в последние десятилетия сформировалось многовидовое обрастание морского типа, состоящее по биомассе на 98 % из чужеродных видов-обрастателей ([19], (рис. 1).

[6] Определить, например, внутриконтинентальный инвазионный коридор можно как группу континентальных и морских прибрежных водоемов, принадлежащих к разным бассейнам, но объединенных транспортными системами, по которым ускоренно за счет снятия естественных географических и экологических барьеров и в процессе их эксплуатации происходит расселение (естественное и антропогенное) водных организмов. Необходимое условие превращения совокупности водных объектов в инвазионный коридор — снятие водораздела, основного географического барьера между ними с помощью соединительных (межбассейновых) водных путей, а достаточное — осуществление регулярного транзита видов через использование объединенной системы водных объектов в качестве судоходного маршрута.

Освоение чужеродными видами-обрастателями внутренних вод быстрее всего протекает в техногенно-трансформированных водоемах или на их участках, таких как водохранилища, водоемы-охладители, и особенно успешно в искусственныхтехноэкосистемах[7], к числу которых мы относим, например, многокомпонентные системы водоснабжения и охлаждения, в том числе объектов топливной [8, 14] и альтернативной энергетики [20], всевозможные гидротехнические конструкции, платформы, опоры, мобильные объекты (суда, оборудование для ведения аквакультуры), сооружения, такие как каналы, дамбы (рис. 3). Именно здесь такие виды, являющиеся источниками биопомех и биоповреждений, формируют наиболее плотные, но нестабильные поселения на всех поверхностях в зонах благоприятной температуры и проточности, достаточной для поддержания благоприятного кислородного режима и приемлемых для фильтраторов пищевых условий.

Для организмов-обрастателей характерны плотные поселения (агрегации, щетки, друзы, пленки, сплошные корки, маты) (рис. 3), с показателями численности и биомассы, не свойственными поселениям подвижных групп животных. Так, на стыках швов оголовка водозаборного сооружения в Цимлянском водохранилище биомасса понто-каспийских двустворчатых моллюсков рода дрейссена (*Dreissena polymorpha, D. bugensis*) составляет более 20 кг/м^2, на понтонах, расположенных на отепляемом участке Финского залива — биомасса центрально американского двустворчатого моллюска митилопсиса (*Mytilopsis leucophaeata*) — 22 кг/м^2 (рис. 3, *д*). Подвержено обрастанию измерительное и навигационное оборудование, например, буи

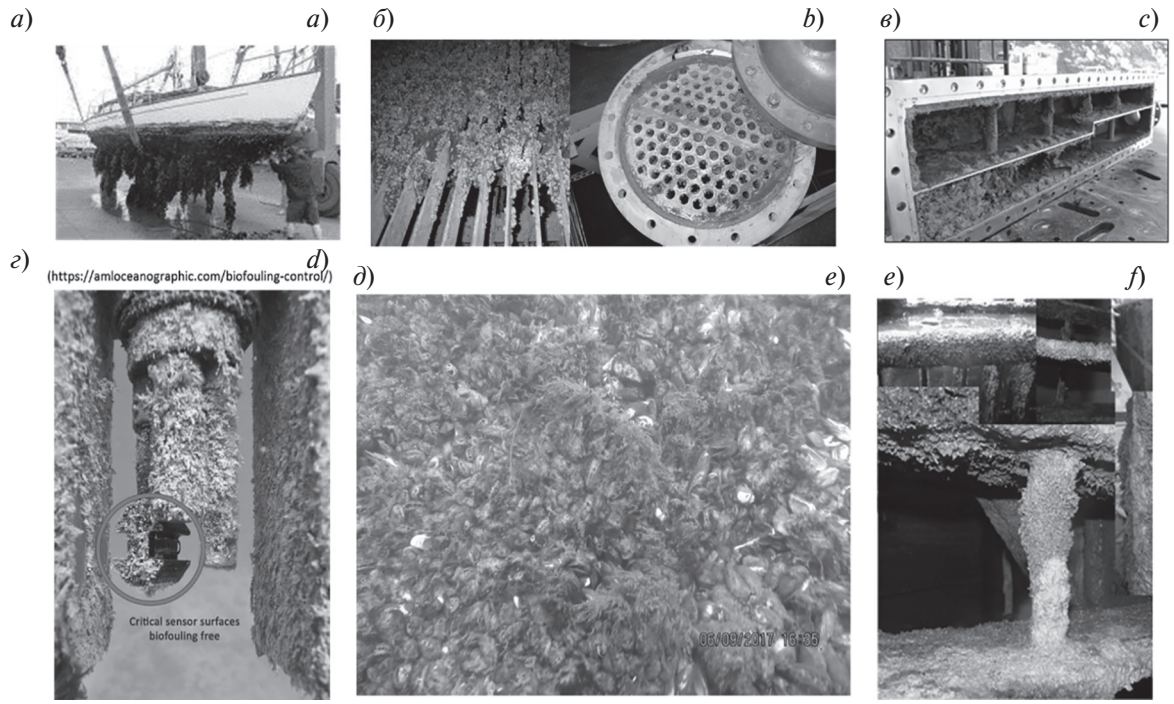


Рис. 3. Поселения обрастателейна различных участках и элементах техноэкосистем. *а* — пример обрастания корпуса судна; *б* — обрастание двустворчатыми моллюсками оборудования электростанции (фото автора); *в*-пример обрастания оборудования СТВ мшанкой в Северной Америке (Канада) (любезно предоставлено RNTConsulting); *г* — обрастание погруженных частей измерительной аппаратуры; *д* — обрастание в сбросном канале электростанции (фото автора); *е* — обрастание водозаборного оборудования мшанкой.

Fig. 3. Settlements of fouling organisms at different portions and elements of technoecosystems. *a* — example of ship fouling; *b* —fouling bivalves at equipment of power plant (authors photo); *c* — example of fouling in service water system equipment by bryozoans in Canada (by courtesy of RNT Consulting); *d* — fouling at submerged measuring equipment; *e* — fouling in discharge canal of power plant; *f* — bryozoan fouling at intake structures of power plant.

[7] Техноэкосистема может быть определена как совокупность биотопов природного и техноантропогенного характера, их живого населения, объединенных системой прямых и обратных связей, потоками вещества, энергии и информации, изменяющихся в пространстве и во времени [14]. Сочетание в такой системе техногенных и природных элементов и формируемых ими связей создает дополнительное разнообразие возможных вариантов формирования поселений живых организмов, в том числе обрастания.

(33 кг/м^2); плавучие платформы (133 кг/м^2) и мн.др. [20]. В итоге, обрастатели как объект-мишень для мер борьбы и профилактики, а сооружения как объект защиты, оказываются одновременно в фокусе наблюдений и научных исследований самого обрастания, поверхностей и материалов с позиций естественных и технических наук и разноплановых инженерных и экономических изысканий [20–24], то есть на стыке науки и практики.

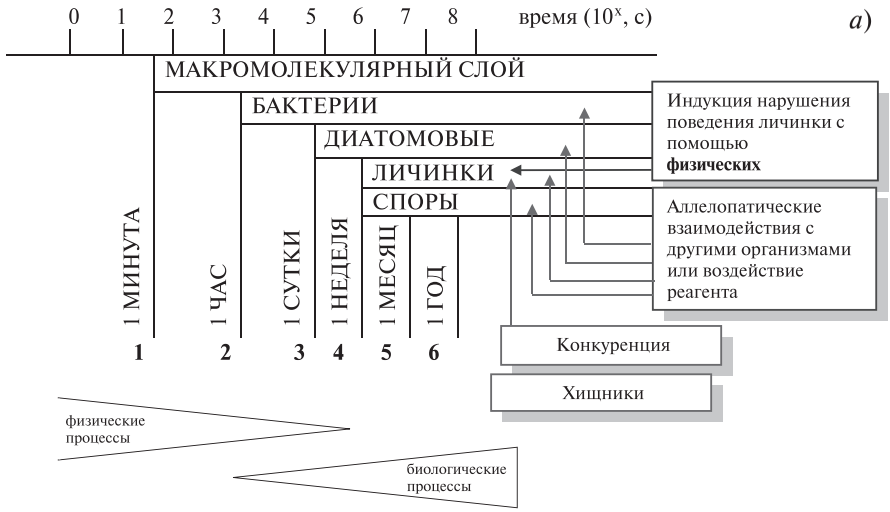
3. Знание о формировании обрастания — теоретическая основа превентивной стратегии предупреждения его развития, защиты материалов и техноэкосистем, обеспечения биобезопасности

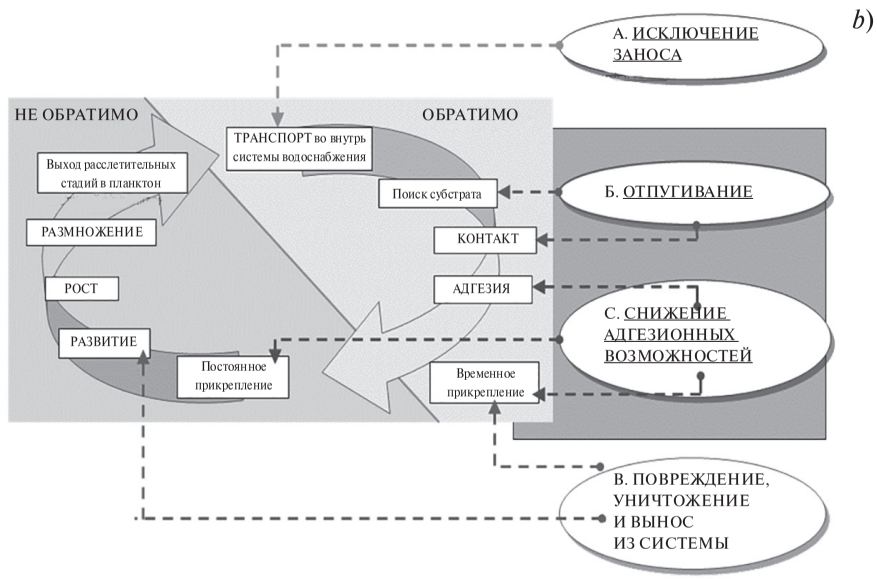
Исследователи сходятся во мнении, что поверхностей — искусственных и естественных, погруженных в воду природных водоемов и при этом абсолютно свободных от присутствия органических молекул и живых организмов (условно стадия 1 на рис. 4, *а*), не существует, а их заселение носит последовательный характер. Последовательность эта достаточно устойчивая, с существенной разницей в длительности прохождения ключевых фаз и стадий: формирование (стадия 2 на рис. 4, *а*) макромолекулярного слоя занимает секунды и обеспечивается присутствием в воде и биологических жидкостях молекул белков, жиров, полисахаридов; оно предшествует образованию (стадия 3) бактериальной (в течение нескольких часов), а затем (стадия 4) бактериально-водорослевой пленки (часы, дни). Далее (стадия 5) происходит колонизация поверхности, покрытой биопленкой, макроорганизмами — водными беспозвоночными (дни и недели), что обеспечивается наличием в воде достигших определенной фазы развития свободноживущих личинок и покоящихся стадий этих животных (см. выше и рис. 2), и (стадия 6) макроводорослями (месяцы и годы), расселяющимися спорами [3, 11, 25–27 и др.]. То есть последовательность выглядит вполне прогнозируемой, что немаловажно для целей планирования защиты на уровне стратегии.

Также выявлена последовательность процессов, протекающих на стадии 5 — при колонизации поверхности личинками конкретных видов обрастателей (рис. 4, *б*), которая непосредственно обеспечивает развитие поселений обрастателей из числа беспозвоночных, с которыми и связывают основные разрушения и потери. В силу биохимических особенностей протекания процесса заселения твердых поверхностей личинками водных беспозвоночных, их оседание, прикрепление и последующий переход (метаморфоз) к прикрепленному образу жизни, сами по себе на отдельных стадиях этого процесса обратимы, а кроме того, часто невозможны без предварительного формирования на субстрате бактериально-водорослевой пленки (биопленка, микропленка (фазы 3 и 4). Это знание — теоретическая основа выбора конкретных (видоспецифичных и универсальных) методов и подходов в стратегии защиты от биообрастания.

Примерная общая схема формирования технического обрастания с двумя периодами, которые можно рассматривать как периоды его обратимого развития и вариантами стратегий устранения биопомех — на рис. 4, *в*. Подобные стратегии ориентированы не на дорогостоящие мероприятия по устранению многокилограммовых образований (рис. 1 и 3), а на своевременный контроль развития биопленки и обратимого прикрепления обрастателя, что теоретически предотвращает формирование на субстрате поселений микроорганизмов и молоди обрастателей — основных источников биопомех.

Вместе с тем имеются пока малоизученные, но, вполне возможно, более многочисленные, чем принято считать, исключения из данного логического построения. По нашим наблюдениям возможно прикрепление одной из разновидностей покоящихся стадий пресноводной мшанки *Plumatella emarginata* — сессобластов (см. второе фото справа в нижнем ряду на рис. 2) к субстратам без сформированной биопленки. Отметим, что обрастание, формируемое пресноводными мшанками, имеющими покоящиеся стадии наиболее проблемно в плане упреждения его развития. Примечательные и опубликованные данные для морских мшанок: личинки одних видов в пределах даже одного рода (*Bugula neritina*, *B. stolonifera*) колонизируют субстраты со сформировавшейся биопленкой, других — до формирования таковой (*B. flabelata)* [28–32]. Причины таких различий не выявлены. Кроме того, природная изменчивость самих живых организмов, особенно вселенцев, формирующаяся как в процессе расселения на фоне климатических и погодных вариаций, воздействия на экосистемы технологических циклов, так и в процессе адаптации к техногенным преобразованиям в соответствии с действием универсальных генетических законов [15], делает эту вполне логичную схему не всегда применимой из-за отсутствия надежных подходов к экологического мониторингу как инструменту оценки того, на какой фазе находится процесс развития обрастания (при разработке стратегии), насколько эффективными оказались примененные меры (при ее пробной реализации верификации) (рис. 5). То есть при переходе от теории к реальной практике.





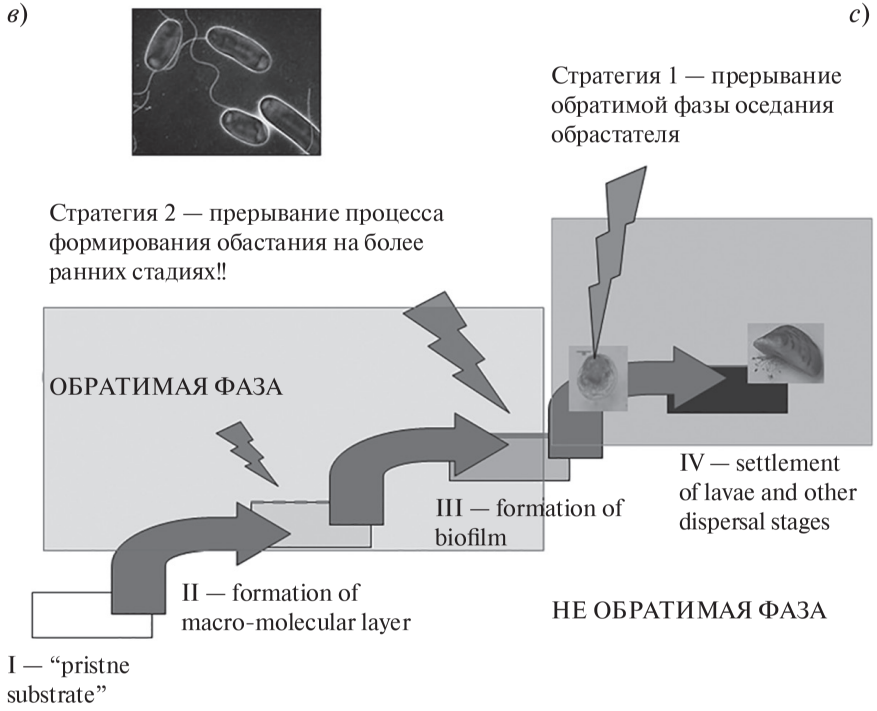


Рис. 4. Универсальная последовательность формирования сообщества обрастания — теоретическая основа планирования превентивной стратегии защиты оборудования от обрастания: *а* — хронология различных стадий формирования, преобладающие физические и биологические процессы, возможные направления воздействия естественных механизмов защиты живых организмов от обрастания; *б* — стадии колонизации твердых субстратов расселительными стадиями обрастателей, обратимые и необратимые процессы (по [3], с изменениями) и возможный комплекс мер; *в*-общая схема процесса колонизации твердого субстрата живыми организмами, с дрейссеной в качестве основного объекта-мишени, на который направлена программа и типы возможных превентивных стратегий (1, или 2, или их комбинация 1+2).

Fig. 4. Universal sequence of fouling community formation — theoretical background for planning a preventative strategy for defensing of equipment from fouling. *a* — chronology of different stages of formation, prevalence of physical or biological processes, possible natural mechanisms and processes of antifouling defensing; *b* — stages of colonization of surface by dispersal stages of a fouling invertebrate, reversible and irreversible processes (by[3] with changes) and possible set of approaches and methods; *c* — overview of a general substrate colonization process by living organisms with the zebra mussel as target object for preventative strategies (1 or 2, or combination of 1 and 2).

Рис. 5. Принципиальные блоки схемы создания и оптимизации стратегии по борьбе и предотвращению биопомех с использованием мониторинга для выработки, пробной реализации и последующей верификации стратегии защиты от обрастания на примере объекта топливной энергетики (по [31]).

Fig. 5. Milestone blocks of the scheme for development and optimization of antifouling strategy with use of monitoring as tool for generation, approbation and verification of a strategy for traditional (fuel) power asset (by [31]).

4. Основные направления и результаты исследований биообрастания

Анализ показал, что к моменту подготовки обзора сложилось 8 основных направлений исследований обрастания различных по целям и задачам и степени разработанности ((1)—(8)).

Состав публикаций последнего десятилетия в рейтинговых международных журналах прежде всего подтверждает: (1) незатухающий интерес научного и инженерного сообщества к биообрастанию как к одному из масштабных и практически значимых явлений современного мира; (2) наличие потребности, в силу масштабности явления, в постоянной актуализации использования существующих традиционных методов сдерживания развития обрастания и в разработке новых экологически безопасных подходов к решению данной проблемы [26, 33]. Так, существенная часть публикаций посвящена созданию новых материалов и защитных покрытий, устойчивых к обрастанию, в том числе биомиметиков [11, 12, 20, 26, 27, 33, 34 и мн. др.] в силу явной недостаточности дистанционных методов защиты через водный поток или слой воды.

Речь идет, например, об изданиях, посвященных фундаментальным исследованиям отдельных компонентов обрастания и сопряженных биологических, химических и физических процессов (Biofouling (The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, издательство Taylorand Francis)) или публикующих результаты прикладных исследований и инженерных разработок по проблеме (Journal of Marinescience and Engineering; Marine Drugs (оба журнала издательства MDPI)); Biotechnology Advances; International Journal of Marine Energy (оба журнала издательства Elsevier); Biointerphases (Springer) и других, отдельных монографиях [4], издающихся уже вторым изданием [32], открытых интернет-источниках, периодических изданиях экологической направленности (STOTEN (Elsevier)),

Для последнего времени характерны исследования (3) возможностей использования обрастателей как биологического ресурса — объекта аквакультуры и инструмента для экологически безопасного снижения последствий антропогенных воздействий на водоемы, в том числе в эвтрофированном Балтийском море [10, 20, 35, 36], а также в составе барьерных технологий. Особенно актуальны эти исследования для прибрежной зоны Балтийского моря — водоема, на берегах которого располагаются наиболее урбанизированные территории Европы, что приводит к прогрессирующей эвтрофикации бассейна. Финский залив — не исключение, здесь натурализовавшиеся популяции дрейссены, митилопсиса и балянуса(*Amphibalanus improvisus*) могут быть использованы при создании биофильтрационных модулей, снижающих биогенную нагрузку, так, как это возможно при культивировании аборигенных балтийских фильтраторов — мидий (*Mytilus trossulus*) [35], рис. 6. Последние в силу относительно низкой солености на российской части акватории Финского залива не обитают.

Исследования обрастания тесно сопряжены с (4) проблемой биологических инвазий (см. цитирования выше), в том числе с исследованиями возможного использования таких видов в вышеописанных барьерных технологиях [10].

На сегодняшний день имеется значительное количество исследований состава, динамики формирования и связанных с обрастанием проблем (биопомехи) [10, 37, 38 и мн.др.], существует концептуальное представление о последовательности формирования обрастания и о наиболее «уязвимых» фазах процесса

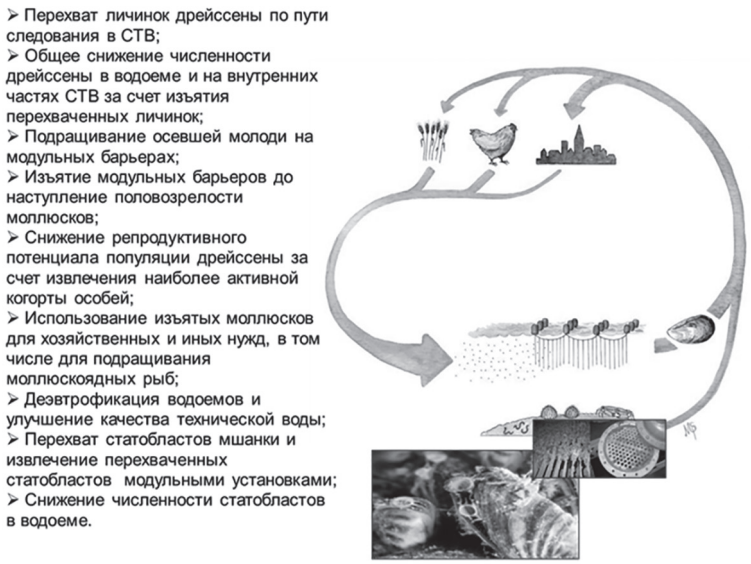


Рис. 6. Принципиальная схема применения и перечень возможных результатов использования барьерной технологии, основанной на аквакультуре обрастателя-фильтратора по [35] с дополнениями.

Fig. 6. Principal scheme of application and list of possible results of a use of barrier technology, based on filtering mussel aquaculture by [35] with additions.

Рис. 7. Планирование защиты от обрастания с использованием референтных (апробированных на объектах защиты сходного типа) подходов на примере объекта традиционной энергетики с прямоточной системой водоснабжения и охлаждения.

Fig. 7. Planning antifouling defensing with use of referent (treated in power industry) approaches at the example of traditional asset with flow-through service water and cooling systems.

(предыдущий раздел, рис. 4). Однако однозначного представления о (5) механизмах и закономерностях формировании самого сообщества обрастания и о природе выявленных исключений, не укладывающихся в концептуальные схемы, не выработано, несмотря на накопление значительного фактографического материала, полученного в результате выполнения как собственно исследований, так и научно-практических работ.

Это указывает на необходимость (6) систематизации накопленных данных и создания баз знаний [27], применения междисциплинарного подхода к выполнению дальнейших поисковых научных исследований [20], направленных на изучение протекания совокупности физических, химических и биологических процессов, приводящих к развитию обрастания, свойств колонизируемых, в том числе искусственных поверхностей, способствующих развитию обрастания и лимитирующих его [3, 11, 27, 32, 34].

Основная проблема лежит в области использования накопленных знаний в практике борьбы и профилактики обрастания и биодеструкции, уточнения инженерных расчетов, испытания в конкретных условиях инновационных средств и корректировки применения традиционных (референтных). Для ее решения необходим (7) полный набор постоянно обновляемых в соответствии с текущей ситуацией сведений (результат мониторинга и прогноза): о (7.1.) распределении обрастания на объекте защиты (карта биопомех); (7.2.) столь же точные сведения о об объектах-мишенях, например, о выходе в планктон расселительных стадий; (7.3.) одномоментно с (7.2) регистрируемые данные о параметрах среды, контролирующих обрастание, в том числе с использованием экспресс-методов; (7.4.) текущие данные об эффективности защитных мер, долговечности защитных материалов [20, 39, 40]. Это требует выбора необходимого и достаточного числа показателей мониторинга, постоянного обновления методов и подходов к наблюдениям и инструментальным измерениям, дозированию реагентов, вплоть до их автоматизации, совершенствования инструментальной базы, а также инфраструктурных проектов для имитационного и физического моделирования при проведении лабораторных и стендовых испытаний методов и подходов [39].

На сегодняшний момент очевидно (8) отсутствие универсальных средств, пригодных к применению во всех отраслях деятельности, на результатах которой сказывается обрастание, равно как и на любом элементе оборудования многокомпонентных объектов защиты, таких, например, как объект топливной энергетики (рис. 7) и необходимости создания отраслевых реестров опробованных защитных средств и технологий их применения.

5. О целевых НИР и ОКР, которые могут быть реализованы в рамках национальных проектов РФ и программ международного сотрудничества в регионе Балтийского моря.

Оценка современных представлений о механизмах и последствиях развития широко распространённого явления — обрастания для различных видов хозяйственной деятельности, связанной с эксплуатацией разнотипных техноэкосистем, локализованных на водных объектах, позволяет наметить перспективы научно-практических исследований, направленных на заполнение существующих пробелов и ориентирование научных исследований на потребности практики.

Проблематика перспективных фундаментальных исследований. Можно констатировать, что проблема обрастания — одна из проблем фундаментальной науки в рамках направлений «экология гидросферы», «проблемы экологии, популяционной биологии и адаптации организмов к среде обитания», «научные основы рационального использования и воспроизводства биологических ресурсов». Очевидно, что первоочередной задачей таких исследований является систематизация имеющихся и получение новых знаний о механизмах, общих закономерностях и частных особенностях взаимодействия организмов-обрастателей, имеющих сложный жизненный цикл, с физической средой на границе раздела фаз (водной и твердой), их межвидовых взаимоотношений и вариантов сукцессии формирования обрастания, то есть ключевой информации для разработки прогнозов развития биопомех, и, следовательно, создания превентивных стратегий их предупреждения [25 и мн.др]. Актуальность таких исследований для северо-западного региона в том числе связана с динамикой пополнения водоемов новыми видами обрастателей в результате биологических инвазий на фоне интенсификации судоходства, гидростроительства, эксплуатации объектов энергетики, климатических изменений.

Научно-практические аспекты. Одна из проблем взаимодействия хозяйствующего субъекта с обрастанием — разработка превентивных подходов к предупреждению биопомехи (или) использованию видов в качестве ресурса, может быть решена в рамках междисциплинарного проекта, сочетающего в себе систематизацию, обработку и введение в практику накопленных теоретических знаний; разработку общих подходов к специализированному мониторингу явления, путем проведения актуальных натурных наблюдений, в том числе и с применением специальных методик и оборудования в условиях непосредственно техноэкосистемы, экспериментальных производственных испытаний с целью выявления закономерностей формирования сообщества обрастания в условиях разнотипных техногенно трансформированных

и искусственных экосистем и под влиянием различных факторов на различных материалах и участках таких систем, подверженных обрастанию — защищенных и контрольных. В связи с этим одно из региональных и отраслевых направлений современных разработок — подготовка и апробация руководящих документов для ведения мониторинга обрастания, разработки стратегий защиты и их дорожных карт.

Технические и инженерные аспекты. Проведение натурных наблюдений биообрастания (океанологических, гидробиологических, геологических, материаловедческих), лабораторных исследований его закономерностей методами гидрофизики, гидрохимии, экологической физиологии и биохимии, как в стандартных экспериментальных условиях, так и с применением специализированного стендового оборудования, имитирующего условия техноэкосистем (включая культивационные модули для улучшения качества воды) возможно при объединении научно-технического потенциала СПбНЦ РАН, ИО РАН, ВНИИГ, других учреждений науки Санкт-Петербурга. В идеале, создание специализированного инжинирингового центра для изучения этого важного природного явления, обусловленного протеканием физических, химических и биологических процессов, позволит существенно продвинуться в вопросах защиты среды обитания человека от его вредного воздействия, а также выявить пути его полезного использования как дополнительного биоресурса.

Для оценки влияния биообрастания на хозяйственную деятельность в регионе Балтийского моря и принятия соответствующих мер целесообразно формирование региональной платформы для многоцелевого (научно-технического и практического) сотрудничества ученых (представителей различных дисциплин) и практиков (инженерного и управляющего персонала объектов защиты, природопользователей, представителей администрации региона, образовательного сообщества) в области информационной поддержки и содействия техническим и инновационным разработкам в части защиты гидротехнических сооружений, систем циркуляционного и технического водоснабжения, объектов промышленности и энергетики, судов и портовой инфраструктуры, иных технических объектов; предупреждения расселения нежелательных видов водных организмов; своевременного выявление источников биопомех и биоповреждений; использования условно «нежелательных» видов для биотехнологий.

Выполнение подобных работ, помимо регионального уровня, ориентировано также на отдельные национальные проекты «Наука», «Экология», «Образование», «Цифровая экономика Российской Федерации» и на межведомственный подход в решении проблемы биобезопасности.

6. Заключение

Природа не терпит пустоты. Биообрастание — жизнь, формирующаяся под влиянием различных движущих сил естественного и техногенного происхождения на разделе жидкой и твердой фазы. Это закономерное природное явление, которое во многом индуцировано человеческой деятельностью и на практике чаще всего рассматривается как нежелательное в разных аспектах своего многообразного проявления. С течением времени, по мере неконтролируемого освоения человеком гидросферы, приводящего к внедрению в водную среду искусственных объектов, разрушению географических и экологических барьеров, происходит ускорение процессов расселения организмов, в том числе обрастателей в морских, а с некоторых пор и в континентальных, водоемах к регистрациям биообрастания в ранее не свойственных для него типах местообитаний, прежде всего техногенных. На фоне побочных эффектов хозяйственной деятельности изучению явления биообрастания, пока, главным образом, в рамках наук о жизни и при решении инженерных задач, начинает придаваться все большое значение. Отражением интереса к предмету можно считать наличие рейтинговых периодических зарубежных изданий, специализирующихся полностью на публикациях результатов фундаментальных исследований отдельных компонентов биообрастания и решению проблемы биопомех, в том числе путем разработки экологически безопасных методов защиты.

В этой связи вполне своевременной следует рассматривать разработку многоцелевого модельного проекта НИР и ОКР, направленного на восполнение имеющихся пробелов в знании и ориентированного на переход от теории к практике в решении проблемы биопомех, связанных с биообрастанием.

7. Финансирование

Публикация подготовлена в рамках государственного задания, договор № 075–01336–20–02 (М.И. Орлова, В.А. Родионов), тема АААА-А19–119020690091–0 (М.И. Орлова).

Литература

1. *Звягинцев А.Ю.* Морское обрастание в северо-западной части Тихого Океана. Владивосток: Дальнаука, 2005. 432 с.
2. *Протасов А.А.* Пресноводный перифитон. Киев: Наукова думка, 1994. 307 с.

3. *Раилкин А.И.* Колонизация твердых тел бентосными организмами. СПб.: Изд. СПБГУ, 2008, 427 с.
4. *Claudi R.*, *Mackie G.L.* Practical manual for zebra mussel monitoring and control. Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo: Lewis Publishers, 1993. 295 p.
5. *Pimentel D.*, *Lach L.*, *Zuniga R.*, *Morrison D.* Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States // Bioscience. 2000. V. 53, N 1. P. 53–66.
6. *Ильин И.Н.* Экология океанического обрастания в пелагиали. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 241 с.
7. Дрейссена, *Dreissenapolymoprha* (Pall.) (Bivalvia, Dreissenidae). Систематика, экология и практическое значение. М.: Наука, 1994. 206 с.
8. *Орлова М.И.*, *Строгова Е.В.*, *Литвинчук Л.Ф.*, *Досмедов И.Х.*, *Кузьмин В.В.* Результаты наблюдений за сезонной динамикой личинок Dreissenidae в водоемах-охладителях: эксплуатация электростанции и стратегия выживания // Региональная экология. 2016. № 1, 43. С. 41–56.
9. Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 688 с.
10. *Stybel N.*, *Fenske C.*, *Schernewski G.* Mussel cultivation to improve water quality in the Szczecin lagoon // Journal of Coastal Research SI. 2010. V. 56. P. 1459–1463.
11. *Bixler G.D.*, *Bhushan B.* Biofouling: lessons from nature // Philosophical Transactions of the Royal Society, A. 2012. V. 370. P. 2381–2417.
12. *Vassileva E.* The challenge of non-fouling surfaces: polymers could be the answer // Journal of Polymer Science and Applications. 2017. V. 1. P. 1–2.
13. *Алимов А.Ф.*, *Богуцкая Н.Г.*, *Орлова М.И.*, *Резник С.Я.*, *Кравченко О.Е.*, *Паевский Д.А.*, *Гельтман Д.В.* Антропогенное распространение видов животных и растений: процесс и результат // Биологические инвазии вводных и наземных экосистемах / Под ред. Алимова А.Ф., Богуцкой Н.Г. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. С. 16–43.
14. *Протасов А.А.*, *Панасенко Г.А.*, *Бабарига С.П.* Биологические помехи в эксплуатации энергетических станций, их типизация и основные гидробиологические принципы ограничения // Гидробиологический журнал. 2008. Т. 44, № 5. С. 36–53.
15. *Орлова М.И.* Биологические инвазии — горнило для эволюции? // Экологическая генетика. 2011. Т. 9, № 3. С. 33–46. doi: 10.17816/ecogen9333–46
16. *Мордухай-Болтовской Ф.Д.* К вопросу о формировании бентоса в крупных водохранилищах // Зоологический Журнал. 1955. № 5. С. 550–556.
17. *Хлебович В.В.*, *Орлова М.И.* Причины и тенденции антропогенного расселения эстуарных организмов // Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах / Под ред. Алимова А.Ф., Богуцкой Н.Г. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. С. 214–221.
18. *Slyn'ko Y.V.*, *Korneva L.G.*, *Rivier I.K.*, *Shcherbina K.H.*, *Papchenkov V.G.*, *Orlova M.I.*, *Therriault T.W.* Caspian-Volga-Baltic invasion corridor // Alien Species in European Waters / Eds. Leppakoski E., Olenin S., Gollasch S. Dordrecht-Boston-London, Kluwer Publishers, 2002. P. 339–411.
19. *Orlova M.I.*, *Telesh I.V.*, *Berezina N.A.*, *Antsulevich A.E.*, *Maximov A.A.*, *Litvinchuk L.F.* Effects of non-indigenous species on diversity and community functioning in the eastern Gulf of Finland (Baltic Sea) // Helgolander Marine Research. 2006. V. 60. P. 98–105.
20. *Loxton J.*, *MacLeod A.K.*, *Nall C.R.*, *McCollin T.*, *Machado I.*, *Simas T.*, *Vance T.*, *Kenny C.*, *Want A.*, *Mille R.G.* Setting and agenda for biofouling research for marine renewable energy industry // International Journal of Marine Energy. 2017. V. 19. P. 292–303.
21. *Jusoh I.*, *Wolfram J.* Effect of marine growth and hydrodynamic loading on offshore structures // J. Mekanikal. 1996. V. 1. P. 77–96.
22. *Theophanatos A.*, *Wolfram J.* Hydrodynamic loading on a macro-roughed cylinders of various aspect ratios // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 1989. V. 111. P. 214–222.
23. *MacLeod A.*, *Stanley M.*, *Day J.*, *Cook E.* Biofouling community composition across a range of environmental conditions and geographical locations suitable for floating marine renewable energy generation // Biofouling. 2016. V. 32(3). P. 261–276.
24. *Nall C.R.*, *Schlappy M.I.*, *Guerin A.J.* Characterization of biofouling community on a floating energy device // Biofouling. 2017. V. 33, N 5. P. 379–396.
25. *Li Y.*, *Ning C.* Latest research progress of marine microbiological corrosion and biofouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling // Bioactive Materials. 2019. V. 4. P. 189–195.
26. *Gittens J.E.*, *Smith T.J.*, *Suleiman R.*, *Akid R.* Current and emerging environmentally-friendly system for fouling control in the marine environment // Biotechnology Advances. 2013. V. 31. P. 1783–1753.

27. *Vinagre P.A.*, *Simas T.*, *Cruz E.*, *Pinori E.*, *Svenson J.* Marine Biofouling: A European database for the marine renewable energy sector // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. V. 8 (495). P. 1–27. doi: 10.3390/jmse8070495
28. *Ryland J.* Behavior, settlement and metamorphosis of Bryozoan larvae: A review // Thalass. Jugosl. 1974. V. 10. P. 239–262.
29. *Mihm J.W.*, *Banta W.C.*, *Loeb G.I.* Effect of absorbed organic and primary fouling film of bryozoan settlement // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 1981. V. 54. P. 167–179.
30. *Prendegast G.S.* Settlement and behavior of marine fouling organisms // Biofouling / Eds. Durr S., Thompson J.S. Chichester, UK: Blackwell Publishing Ltd., 2010. P. 30–59.
31. *Орлова М.И.* Долгосрочная программа предупреждения развития биопомех на АЭС, связанных с обрастанием: особенности организмов-источников биопомех, общие принципы формирования программы и значение мониторинга // Труды 4-й Научно-практической конференции «Экологическая и радиационная безопасность объектов атомной энергетики». Калининград: Балтийская АЭС, 2017. С. 230–238.
32. *Mackie G.*, *Claudi R.* (eds.) Monitoring and control of macrofouling mollusks in fresh water systems. Second edition. Boca Raton, CRC Press, 2010. 508 p.
33. *Gu Y.*, *Yu L.*, *Mou J.*, *Wo D.*, *Xu M.*, *Zhou P.*, *Ren Y.* Research strategies to develop environmentally friendly marine antifouling coatings // Marine Drugs. 2020. V. 18 (371). P. 1–22.
34. *Myan F.W.E.*, *Walker J.*, *Paramor O.* The interaction of marina fouling organisms with topography of varied scale and geometry: a review // Biointerphases. 2013. V. 8. P. 1–30.
35. *Lindahl O.*, *Hart R.*, *Hernroth B.*, *Kollberg S.*, *Loo L.O.*, *Olrog L.*, *Rehnstam-Holm A.S.*, *Svensson J.*, *Svensson S.*, *Syversen U.* Improving marine water quality by mussel farming: a profitable solution for Swedish society // Ambio Mar. 2008. V. 34, N 2. P. 131–138.
36. *Kotta J.*, *Futter M.*, *Kaasik A.*, *Liversage K.*, *Rätsep M.*, *Barboza F.R.*, *Bergström L.*, *Bergström P.*, *Bobsien I.*, *Díaz E.*, *Herkül K.*, *Jonsson P.R.*, *Korpinen S.*, *Kraufvelin P.*, *Krost P.*, *Lindahl O.*, *Lindegarth M.*, *Lyngsgaard M.*, *Mühl M.*, *Nyström Sandman A.*, *Orav-Kotta H.*, *Orlova M.*, *Skov H.*, *Rissanen J.*, *Šiaulys A.*, *Vidakovic A.*, *Virtanen E.* Cleaning up seas using blue growth initiatives: Mussel farming for eutrophication control in the Baltic Sea // Science of the Total Environment. 2020. V. 709. 20 March 2020. 136144. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136144
37. *Зевина Г.Б.* Биология морского обрастания. М.: Изд-во МГУ, 1994. 132 с.
38. *Moshchenko A.V.*, *Zvyagintsev A.Y.* Macrofouling Communities in the Cooling System of the Vladivostok Heat and Power Plant // Ocean Science Journal. 2010. V. 45(1). P. 41–54. doi: 10.1007/s12601–010–0004–5
39. МР 1.1.4.1542–2019. Применение методов борьбы с биопомехами в системах циркуляционного и технического водоснабжения атомных электростанций. Методические рекомендации. М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2019. 265 с.
40. МТ 1.2.1.1043–2015. Ведение биолого-химического мониторинга систем циркуляционного и технического водоснабжения атомных электростанций. Методика. М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2015. 63 с.
41. *Carlton J.T.* Man's role in changing the face of the ocean: Biological invasions and implications for conservation of nearshore environments // Conservation Biology. 1989. V. 3. P. 265–273.
42. *Williamson M.* Biological Invasions. Population and Community Biology series. V. 15. London: Chapman and Hall, 1996. 244 p.

References

1. *Zvyagintzev A.Yu.* Marine biofouling in the north-west part of the Pacific Ocean. *Vladivostok, Dal'nauka,* 2005. 432 p. (in Russian).
2. *Protasov A.A.* Freshwater periphyton. *Kiev*, *Naukova Dumka*, 1994. 307 p. (in Russian).
3. *Railkin A.I.* Colonization of solids by benthic organisms. *Sankt-Peterburg, Isdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo Universiteta,* 2008. 427 p. (in Russian).
4. *Claudi R.*, *Mackie G.L.* Practical manual for zebra mussel monitoring and control. *Boca Raton*, *Ann Arbor*, *London*, *Tokyo*, *Lewis Publishers*, 1993. 295 p.
5. *Pimentel D.*, *Lach L.*, *Zuniga R.*, *Morrison D.* Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. *Bioscience*. 2000, 53, 1, 53–66.
6. *Ill'in I.N.* Ecology of oceanic biofouling in pelagial. *Moscow*, *Tovarishchestvo Nauchnykh Izdanii KMK*, 2008. 241 p. (in Russian).
7. Dreissena *Dreissenapolymoprha* (Pall.) (Bivalvia, Dreissenidae). Systematics, ecology and practical meaning. *Moscow, Nauka*, 1994. 206 p. (in Russian).
8. *Orlova M.I.*, *Strogova E.V.*, *Litvinchuk L.F.*, *Dosmedov I. Kh.*, *Kuzmin V.V.* Results from observations on seasonal dynamics of Dreissenidae larvae in cooling water-bodies: exploitation of power plant and strategy of survivorship. *Regional Ecology*. 2016, 1(43), 41–56 (in Russian).

9. The most dangerous invasive species in Russia (TOP-100). *Moscow*, *Tovarishchestvo Nauchnykh Izdanii KMK*, 2018. 688 p. (in Russian).
10. *Stybel N.*, *Fenske C.*, *Schernewski G.* Mussel cultivation to improve water quality in the Szczecin lagoon. *Journal of Coastal Research SI*. 2010, 56, 1459–1463.
11. *Bixler G.D.*, *Bhushan B.* Biofouling: lessons from nature. *Philosophical Transactions of the Royal Society, A*. 2012, 370, 2381–2417.
12. *Vassileva E.* The challenge of non-fouling surfaces: polymers could be the answer. *Journal of Polymer Science and Applications*. 2017, 1, 1–2.
13. *Alimov A.F.*, *Bogutskaya N.G.*, *Orlova M.I.*, *Reznik S.Z.*, *Kravtchenko O.E.*, *Paevskii D.A.*, *Geltman D.V.* Antropogenic dispersal of species of animals and plants: the process and theresults. *Biological Invasions in Aquatic and Terrestrial Ecosystems* / Eds. Alimov A.F., Bogutskaya N.G. *Moscow*, *Tovarishchestvo Nauchnykh Izdanii KMK*, 2004, 16–43 (in Russian).
14. *Protasov A.A.*, *Panasenko G.A.*, *Babariga S.P.* Biological hindrances in power stations exploitation, their typization and main hydrobiological principles of control. *Hydrobiological Journal*. 2009, 45, 1, 32–45. doi: 10.1615/HydrobJ.v45.i1.30
15. *Orlova M.I.* Is biological invasion crucible for evolution? *Ecological Genetics*. 2011, 9, 3, 33–46. doi: 10.17816/ecogen9333–46 (in Russian).
16. *Mordukhai-Boltovskoi F.D.* To the question of benthos development in large water reservoirs. *Zoologicheskii Zhurnal*. 1955, 550–556 (in Russian).
17. *Khlebovich V.V.*, *Orlova M.I.* Causes and tendencies of man-mediated dispersal of estuarine organisms. *Biological Invasions in Aquatic and Terrestrial Ecosystems* / Eds. Alimov A.F., Bogutskaya N.G. *Moscow*, *Tovarishchestvo Nauchnykh Izdanii KMK*, 2004, 214–221 (in Russian).
18. *Slyn'ko Y.V.*, *Korneva L.G.*, *Rivier I.K.*, *Shcherbina K.H.*, *Papchenkov V.G.*, *Orlova M.I.*, *Therriault T.W.* Caspian-Volga-Baltic invasion corridor. *Alien Species in European Waters* / Eds. Leppakoski E., Olenin S. and Gollasch S. *Dordrecht-Boston-London*, *Kluwer Publishers*, 2002, 339–411.
19. *Orlova M.I.*, *Telesh I.V.*, *Berezina N.A.*, *Antsulevich A.E.*, *Maximov A.A.*, *Litvinchuk L.F.* Effects of non-indigenous species on diversity and community functioning in the eastern Gulf of Finland (Baltic Sea). *Helgolander Marine Research*. 2006, 60, 98–105.
20. *Loxton J.*, *MacLeod A.K.*, *Nall C.R.*, *McCollin T.*, *Machado I.*, *Simas T.*, *Vance T.*, *Kenny C.*, *Want A.*, *Mille R.G.* Setting and agenda for biofouling research for marine renewable energy industry. *International Journal of Marine Energy*. 2017, 19, 292–303.
21. *Jusoh I.*, *Wolfram J.* Effect of marine growth and hydrodynamic loading on offshore structures. *J. Mekanikal*. 1996, 1, 77–96.
22. *Theophanatos A.*, *Wolfram J.* Hydrodynamic loading on a macro-roughed cylinders of various aspect ratios. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 1989, 111, 214–222.
23. *MacLeod A.*, *Stanley M.*, *Day J.*, *Cook E.* Biofouling community composition across a range of environmental conditions and geographical locations suitable for floating marine renewable energy generation. *Biofouling*. 2016, 32(3), 261–276.
24. *Nall C.R.*, *Schlappy M.I.*, *Guerin A.J.* Characterization of biofouling community on a floating energy device. *Biofouling*. 2017, 33 (5), 379–396.
25. *Li Y.*, *Ning C.* Latest research progress of marine microbiological corrosion and biofouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling. *Bioactive Materials*. 2019, 4, 189–195.
26. *Gittens J.E.*, *Smith T.J.*, *Suleiman R.*, *Akid R.* Current and emerging environmentally-friendly system for fouling control in the marine environment. *Biotechnology Advances*. 2013, 31, 1783–1753.
27. *Vinagre P.A.*, *Simas T.*, *Cruz E.*, *Pinori E.*, *Svenson J.* Marine Biofouling: A European database for the marine renewable energy sector. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020, 8 (495), 1–27. doi: 10.3390/jmse8070495
28. *Ryland J.* Behavior, Settlement and Metamorphosis of Bryozoan larvae: A review. *Thalass. Jugosl.* 1974, 10, 239–262.
29. *Mihm J.W.*, *Banta W.C.*, *Loeb G.I.* Effect of absorbed organic and primary fouling film of bryozoan settlement. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 1981, 54, 167–179.
30. *Prendegast G.S.* Settlement and behavior of marine fouling organisms. *Biofouling*/ Eds.Durr S., Thompson J.S. *Chichester*, *UK*, *Blackwell Publishing Ltd*., 2010, 30–59.
31. *Orlova M.I.* Long term program of prevention at NPP the development of biohazards, related to biofouling: peculiarities of fouling organismsm — sources of biohazards, general principled pf a program formation and importance of monitoring. *Trudy 4-j Naucho-Prakticheskoi Konferenci "Ecologicheskaya i Radiatsionnaya Bezopasnost' Objectov Atomnoj Energetiki"*. *Kaliningrad*, *Baltijskaya AES*, 2017. P. 230–238 (in Russian).
32. *Mackie G.*, *Claudi R.* (eds.) Monitoring and control of macrofouling mollusks in fresh water systems. Second edition. *Boca Raton*, *CRC Press*, 2010. 508 p.
33. *Gu Y.*, *Yu L.*, *Mou J.*, *Wo D.*, *Xu M.*, *Zhou P.*, *Ren Y.* Research Strategies to Develop Environmentally Friendly Marine Antifouling Coatings. *Marine Drugs*. 2020, 18 (371), 1–22.

34. *Myan F.W.E.*, *Walker J.*, *Paramor O.* The interaction of marina fouling organisms with topography of varied scale and geometry: a review. *Biointerphases*. 2013, 8, 1–30.
35. *Lindahl O.*, *Hart R.*, *Hernroth B.*, *Kollberg S.*, *Loo L.O.*, *Olrog L.*, *Rehnstam-Holm A.S.*, *Svensson J.*, *Svensson S.*, *Syversen U.* Improving marine water quality by mussel farming: a profitable solution for Swedish society.*Ambio Mar.* 2008, 34(2), 131–138.
36. *Kotta J.*, *Futter M.*, *Kaasik A.*, *Liversage K.*, *Rätsep M.*, *Barboza F.R.*, *Bergström L.*, *Bergström P.*, *Bobsien I.*, *Díaz E.*, *Herkül K.*, *Jonsson P.R.*, *Korpinen S.*, *Kraufvelin P.*, *Krost P.*, *Lindahl O.*, *Lindegarth M.*, *Lyngsgaard M.*, *Mühl M.*, *Nyström Sandman A.*, *Orav-Kotta H.*, *Orlova M.*, *Skov H.*, *Rissanen J.*, *Šiaulys A.*, *Vidakovic A.*, *Virtanen E.* Cleaning up seas using blue growth initiatives: Mussel farming for eutrophication control in the Baltic Sea. *Science of the Total Environment*. 2020, 709, 2020, 136144. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136144
37. *Zevina G.B.* Biology of marine fouling. *Moscow*, *Isdatel'stvo MGU*, 1994. 132 p. (in Russian).
38. *Moshchenko A.V.*, *Zvyagintsev A.Y.* Macrofouling Communities in the Cooling System of the Vladivostok Heat and Power Plant. *Ocean Science Journal*. 2010, 45(1), 41–54. doi: 10.1007/s12601–010–0004–5
39. MR1.1.4.1542–2019. Application of methods of fight against biohazard in cooling and service water systems of nuclear power plants. Methodical recommendations. *Moscow, AO "Kontsern Rosenergoatom"*, 2019. 265 p. (in Russian).
40. MT 1.2.1. 1043–2015. Carrying out biological and chemical monitoring in cooling and service water systems. Methods. *Moscow, AO "Kontsern Rosenergoatom",* 2015. 63 p. (in Russian).
41. *Carlton J.T.* Man's role in changing the face of the ocean: Biological invasions and implications for conservation of nearshore environments. *Conservation Biology*. 1989, 3, 265–273.
42. *Williamson M.* Biological Invasions. *Population and Community Biology Series*. V. 15. *London*, *Chapman and Hall*, 1996. 244 p.