

## **Обрастатели – источники биопомех объектов энергетики в техногенно-трансформированных континентальных и прибрежных морских водоёмах Европейской части Российской Федерации**

*М.И. Орлова<sup>1,2)</sup>, Е.В. Строгова<sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук  
199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, дом 5

<sup>2)</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Зоологический институт Российской академии наук  
199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, дом 1

### **Введение**

Один из актуальных аспектов конфликтного взаимодействия Природы и Человека заключается в таком отклике биосферы на антропогенное воздействие, как использование объектов техногенного происхождения объектами природными. Наиболее наглядно и масштабно этот аспект демонстрируют процессы стихийного антропогенного расселения представителей разных царств живых организмов (биологические инвазии<sup>1)</sup> с транспортом, например, водным, и колонизация организмами-обрастателями морских, береговых и сухопутных структур, обеспечивающих работу реального сектора экономики и оборонного сектора. Нарастание темпов и масштабов обоих процессов [1, 2 и др.] определяется стремлением всего живого к экспансии [3]; стратегическими особенностями конкретных (как правило, пионерных) видов<sup>2)</sup>; комплексом причин смешанного генезиса – самой деятельностью человека, следствием которой становится снятие географических и экологических барьеров, создание новых техногенных местообитаний, на фон естественных погодных и климатических, геоморфологических изменений, способностью организмов адаптироваться к новым условиям окружающей среды.

Изучение биологии практически значимых чужеродных и аборигенных видов водных животных и растений, способных, с одной стороны, играть в водных экосистемах роль эдификаторов, создающих микроместообитания и пищевые ресурсы для других гидробионтов и положительно влиять на формирование качества воды, а с другой, осваивать и массово развиваться на наружных и внутренних поверхностях рукотворных объектов, имеет своей прикладной задачей создание научно-обоснованного подхода к адекватному использованию природного капитала, с одной

стороны, и к упреждению вызовов для технологической безопасности страны со стороны гидробионтов, с другой. Например, таких вызовов, как биопомехи<sup>3</sup> и биоповреждения<sup>3</sup>, угрожающих системам технического водоснабжения и охлаждения предприятий энергетики и промышленности, использующих воду природных и искусственных водоёмов и формирующих техноэкосистемы<sup>4</sup> в совокупности с этими водоёмами.

В 2022 г. в рамках направления «Экология и природные ресурсы» в СПбНЦ РАН была проведена сравнительная оценка успеха колонизации техногенных объектов, расположенных в континентальных водоёмах, двумя наиболее успешными группами обрастателей – представителями родов *Dreissena* (двустворчатые моллюски, *унитарные организмы*) и *Plumatella* (покрыторотые мшанки, *модульные организмы*). Исследование заключалось в обобщении информации открытых источников, накопленных фондовых материалов СПбНЦ РАН и результатов полевых наблюдений и экспериментальных работ, выполненных главным образом в 2012-2021 гг. на выборке разнотипных географических объектов – небольших континентальных водоёмов и участка прибрежного морского водоёма – Копорской Губы Финского залива Балтийского моря. Эти водоёмы используются в качестве источника водоснабжения для объектов традиционной энергетики – атомных электростанций (АЭС) (рис. 1). В качестве типичного примера техногенного объекта выбрана открытая системы технического водоснабжения (СТВ) и охлаждения, включающая в себя и водоём<sup>4</sup>.

## 1. Состав и распространение источников биопомех

### 1.1. Общая характеристика

Исследования показали распространение в 2012-2021 гг. в выборке (рис. 1) водных организмов, являющихся и непосредственно источниками<sup>5</sup> биопомех в результате формирования ими обрастания<sup>5</sup> и наносов, и способствующих развитию таковых. Всего, в общей сложности, выявлено 26 биологических объектов: видов, крупных таксономических групп и экологических группировок автотрофных и гетеротрофных живых организмов (состав ассоциаций биоплёнки и бактериально-водорослевых матов не рассматривался).

Среди гетеротрофных источников биопомех по разнообразию преобладали водные беспозвоночные, унитарные и модульные, включая виды, отнесённые к 100 наиболее опасным [4] из числа расселяющихся по Российской Федерации (двустворчатые моллюски: понто-каспийские дрейссена речная *Dreissena polymorpha*, дрейссена бугская *D. bugensis*, два вида, ведущих своё происхождение из атлантических прибрежных вод центральной Америки – ложная мидия *Mytilopsis leucophaeta* (Dreissenidae) и рангия клиновидная *Rangia cuneata* (Mactridae),

североатлантический усоногий рачок *Amphibalanus improvisus*). Среди автотрофных организмов обычны зелёные нитчатые водоросли, цианобактерии – планктонные и гетеротопные, после аномального цветения которых усиливается формирование отложений на технических поверхностях, регистрируется внесезонное пробуждение покоящихся стадий обрастателей беспозвоночных, способных к вегетативному размножению ([5] и подраздел 2.2).

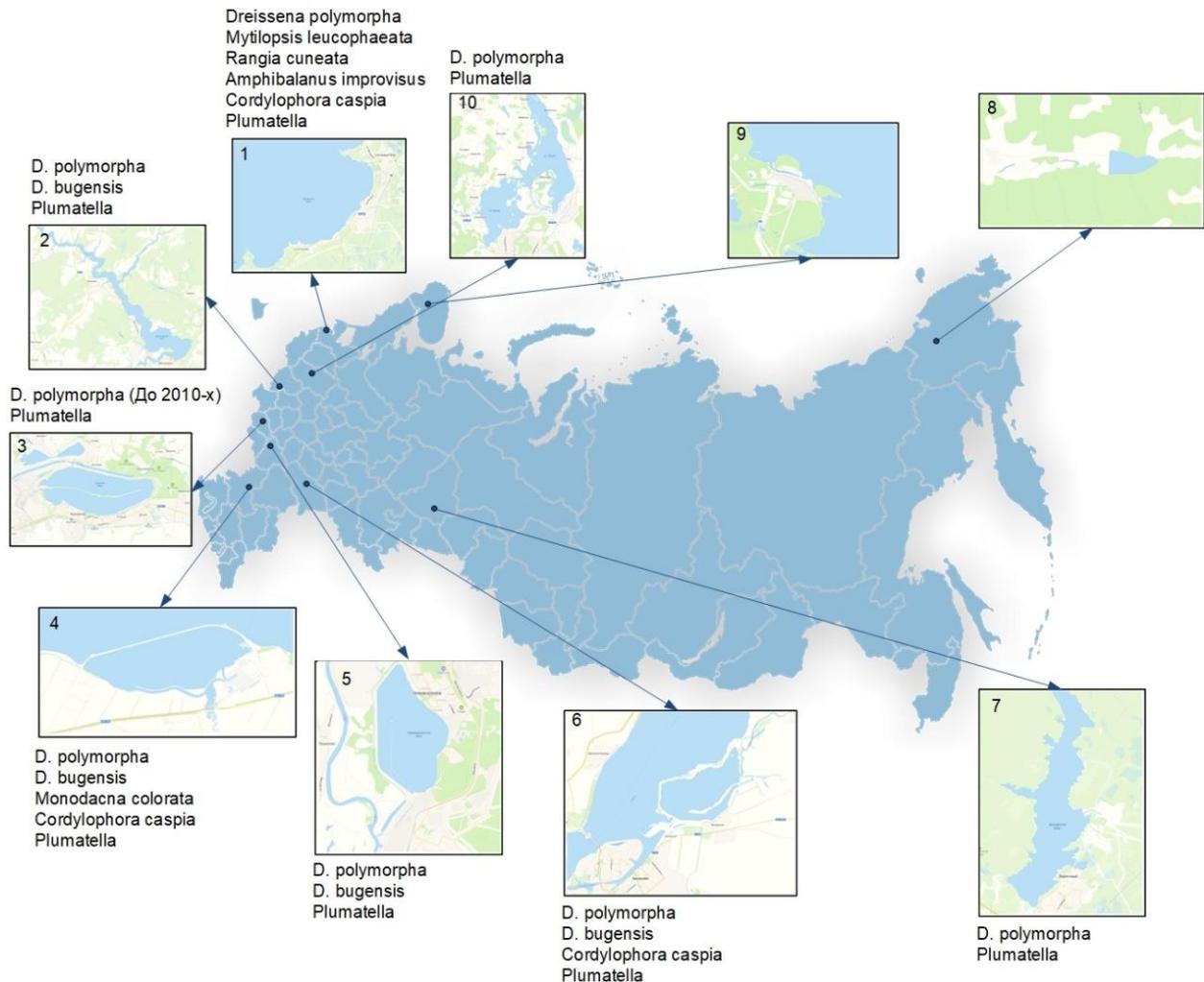


Рис. 1. Выборка водных объектов – источников водоснабжения АЭС Российской Федерации [6] и распространение в них унитарных (двустворчатые моллюски (сем. Dreissenidae: *Dreissena polymorpha*, *D. bugensis*, *Mytilopsis leucophaeata*; сем. Mactridae: *Rangia cuneata*; сем. Cardiidae: *Monodacna colorata*, усоногие ракообразные – *Amphibalanus improvisus*) и модульных (колониальные гидроидные полипы – *Cordylophora caspia*, мшанки – род *Plumatella*) водных беспозвоночных, способных к быстрой колонизации систем технического водоснабжения объектов промышленности и энергетики.

Цифровые обозначения: 1. Копорская Губа (восточная часть Финского залива Балтийского моря); 2 – водохранилище в русле р. Десна; 3 – наливной водоём в русле и долине р. Сейм; 4 – отсечной водоём, Цимлянское водохранилище; 5 – р. Дон и наливной искусственный водоём, запитываемый из р. Дон; 6 – отсечной водоём, Саратовское водохранилище; 7 – водохранилище в русле р. Пышма; 8 – водохранилище в русле ручья Поннеурген; 9 – оз. Имандра; 10 – Система озёр Удомля (тектоническое) Песьво (термокарстовое)

Наиболее широкое распространение в исследованной выборке (8 водных объектов из 10) получили упоминавшиеся выше двустворчатые моллюски-обрастатели семейства дрейссеновых (*D. polymorpha* (7 водоёмов, до 2010-х – 8), *D. bugensis* (4 водоёма), *Mytilopsis leucophaeta* (1 водоём)). Все 3 представителя семейства, имея различное происхождение, продолжают расселяться по пресным и солоноватым водоёмам Голарктики, включая техногенно-трансформированные, где становятся, с одной стороны, важным компонентом живых сообществ (рис. 2), с другой, – проблемой при эксплуатации технических объектов [2, 7].

Модульных организмов в исследованных техноэкосистемах обнаружено в общей сложности 6 видов. Это колониальный гидроидный полип *Cordylophora caspia*, освоивший два высокоминерализованных континентальных водоёма выборки (рис. 1) и Финской залив, где стал частью трофических цепей его естественных сообществ (рис. 2). На значительной части территории выборки встречены пресноводные мшанки, в общей сложности 5 видов [5]. Среди мшанок наибольшего внимания заслуживает род *Plumatella*, представленный и аборигенными видами, и вселенцами. Среди первых – *P. emarginata*. Чужеродными, а возможно, криптическими, следует считать еще 2 вида, сходных с *P. emarginata*, идентифицированных в собранных пробах В.И. Гонтарь [8, 9] – *P. geimermassardi* (Копорская Губа (1 на рис. 1)) и *P. similirepens* (оз. Удомля, 10 – на рис. 1).

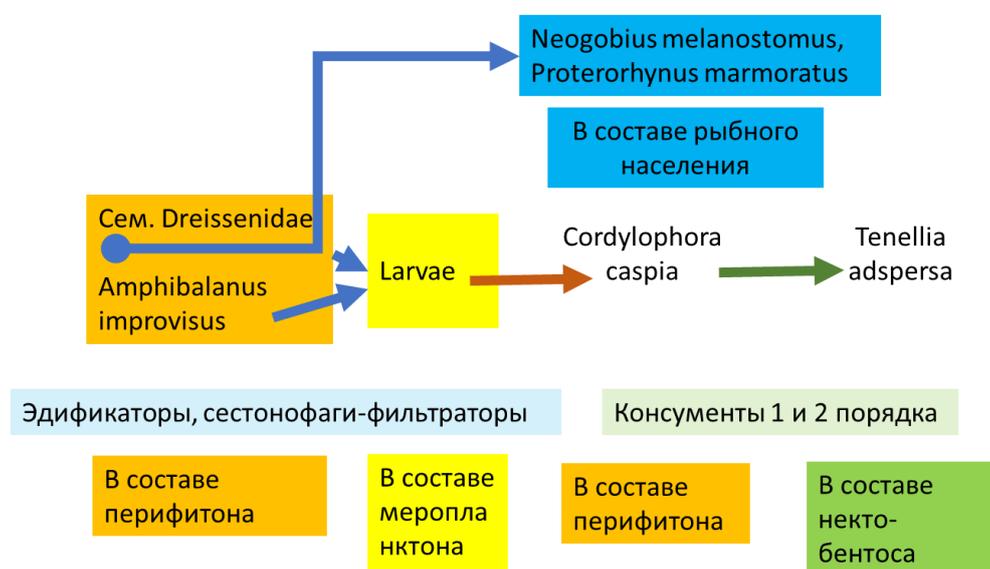
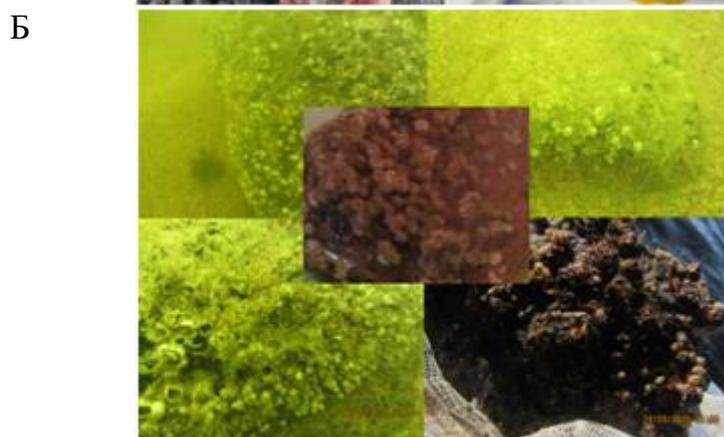


Рис. 2. Пример фрагмента донной трофической сети, который может быть сформирован вселенцами в континентальных водоёмах и который реализован в олигогалинных условиях Финского залива. Его основа состоит из видов-вселенцев – экосистемных инженеров – двустворчатых моллюсков-обрастателей сем. Dreissenidae и колониального гидроидного полипа *Cordylophora caspia* и связанных с ними трофически и топически потребителей *C. caspia* голожаберного моллюска *Tenellia adspersa* и рыб-бентофагов черноротого бычка (*Neogobius melanostomus*), использующего в пищу моллюсков-обрастателей, и хищного бычка-цуцка (*Proterorhynchus marmoratus*) (из [14])

Наиболее распространённым источником биопомех в исследуемые годы был род *Dreissena* (рис. 1, 3 А, Д). Этот род инвазионных пресноводных двустворчатых моллюсков имеет, несмотря на обитание в континентальных водоёмах, морской жизненный цикл с личинкой (рис. 3 Д), что сближает его с типичным морским прибрежным видом *Amphibalanus improvisus* (рис. 1, рис. 3 Б, Е). Дрейссена продолжает оставаться в фокусе внимания хозяйственников и исследователей. Именно на неё уже почти 30 лет ориентированы современные программы реагирования и профилактики развития обрастания в континентальных водоёмах [2, 10], включая российскую энергетику [11, 12].



А – поселение Dreissenidae и *Plumatella* на подводных водозаборных сооружениях (фото М.И. Орловой) и отдельные особи двух видов *Dreissena* (фото Т. Nalepa)



Б – морские жёлуди (*A. improvisus*) в донных биотопах Финского залива (фото Ю.А. Зуева, С.В. Голдина, М.И. Орловой)



В – формирование колонии *S. caspia* на экспериментальной пластине (фото М.И. Орловой)



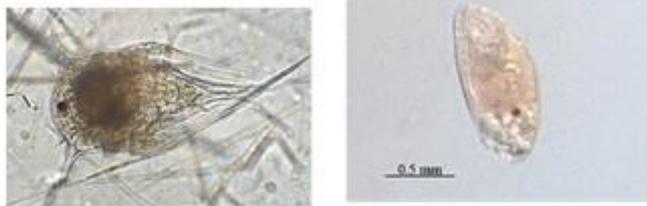
Г – колония мшанки невооружённым глазом и с увеличением с просвечивающими статобластами (*P. geimermassardi*), под микроскопом (фото М.И. Орловой).

Д



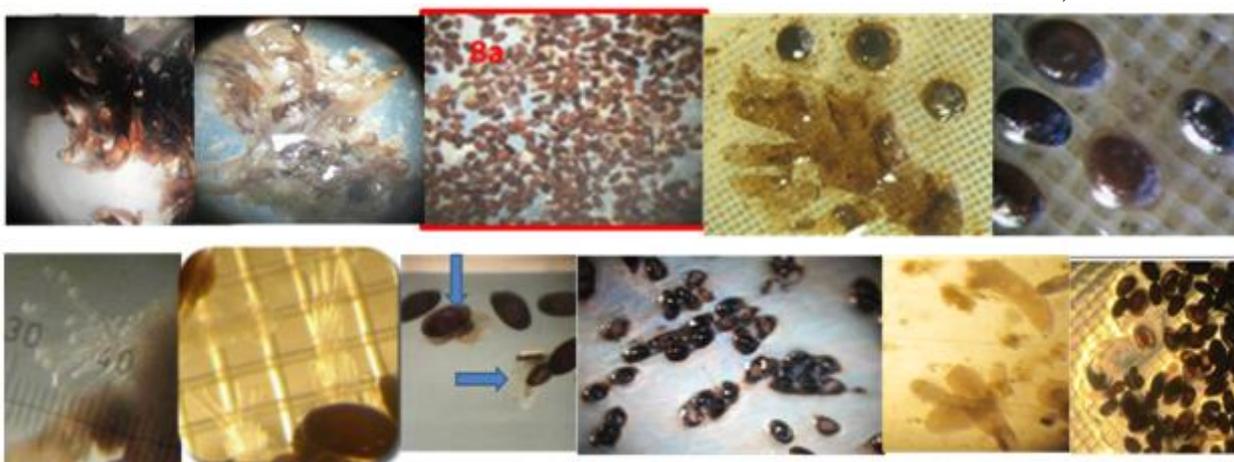
Д – Личинки представителей сем. Dreissenidae - слева велигер *D. polymorpha*, в центре велигер *M. leucophaeata* – оба с развитыми макушками, справа велигер *M. leucophaeata* D-стадия (идентификация и фотографии Л.П. Флячинской)

Е



Е – личинка морского жёлудя Баянуса – науплиус (слева) и ципривидная личинка (справа) (из <https://wikipedia.tel/%D0%91%D0%B0%D0%BB%D1%8F%D0%BD%D1%83%D1%81%D1%8B>)

Ж



Ж – расселительные (унитарные) и модульные стадии *Plumatella* слева-направо: зооид-основатель колонии *P. geimemassardi*; зооид *P. emarginata*, выходящий из живого статобласта; то же в фиксированной пробе; тот же вид – сессобласты на экспериментальной пластине, возможно, тот же вид, зооиды со втянутыми цистидами; тот же вид – флотирующие агрегации статобластов и вылупляющихся зооидов (фото Е.В. Строговой и М.И. Орловой)

Рис. 3. Основные группы обростателей – унитарных и модульных беспозвоночных выборки водоёмов. Сессильные особи (взрослые для унитарных организмов, колонии для модульных) (А-Г) и расселительная часть метапопуляций тех же видов (вагильные) особи или их группы (Д-Ж)

Модульным организмам на объектах, расположенных в континентальных водоёмах, до недавнего времени внимания, как выяснилось, уделялось недостаточно [13]. В незначительном количестве в техническом обрастании такие организмы, например, как пресноводные покрыторотые мшанки рода *Plumatella* (рис. 3 Г, Ж), способные как к половому, так и к вегетативному размножению и имеющие в результате вегетативного размножения специфическую расселительную стадию, покоящуюся почку, статобласт, представленную двумя типами особей (рис. 3 З, рис. 4), лишь отмечались наблюдателями. Мшанки вполне обычны в составе

технического обрастания, однако, чаще всего из-за незначительного количественного развития, им не придают большого значения, хотя возможны и исключения (см. подраздел 1.2). Массового развития может достигать и колониальный гидроидный полип *C. caspia* (рис. 3 Г), который, за редким исключением [13] также пока не принимается во внимание.

## 1.2. Причины развития и тенденции в изменении состава обрастателей в исследованной выборке техноэкосистем

Водоём, формирующий вместе с АЭС единую техноэкосистему<sup>4</sup>, являясь открытой частью такой системы, предрасположен к развитию в нём теплолюбивых пионерных массовых видов гидробионтов, способных быстро и эффективно осваивать нарушенные местообитания<sup>2</sup>. Причины предрасположенности – рост температуры воды и, как следствие, удлинение вегетационного сезона; дополнительная циркуляция вод и дополнительный приток биогенов и органического вещества из разных источников, включая ресуспензию из донных отложений, усиливающуюся за счёт циркуляции; создание искусственных (дополнительных) твердых субстратов (отсыпки, поверхности оборудования; ведение аквакультуры, биомелиоративных и биоремедиационных мероприятий (альголизация, [15]). Закрытая часть техноэкосистемы, то есть собственно объект энергетики, исходно обладающая значительной протяженностью искусственных поверхностей, омываемых водой, при протекании перечисленных процессов в водоёме становится благоприятным местообитанием для прикрепленных видов, имеющих расселительные стадии, нетребовательных к пище и способных к питанию из водной толщи (фильтраторы, в меньшей зоопланктофаги).

В период 2012-2021 гг. основными тенденциями в исследуемой выборке (рис. 1) были: возрастание роли автотрофных организмов, географическое расширение ареала дрейссены, обнаружение новых видов – потенциальных источников биопомех, включая два вида мшанки р. *Plumatella*.

На значительной части объектов выборки регистрировалось устойчивое присутствие на экспериментальных пластинах (искусственных субстратах) из оргстекла (рис. 3) и металла, экспонируемых в водоёме, мшанки р. *Plumatella*. На одном из объектов, уже начиная с 2010-х гг., отмечено преобладание, а затем абсолютное доминирование мшанки *P. emarginata* над дрейссеной (*D. polymorpha*) с постепенным полным исчезновением дрейссены из водоёма-охладителя при наличии её обычной метапопуляции в подпитывающей водоём реке, где она обитает совместно с двумя видами плюмателлы.

Вполне возможно, что замене дрейссены на мшанку отчасти способствовало применение мер защиты объекта от обрастания, сформированного дрейссеной,

приведшее к устранению дрейссены из местообитаний, доступных обоим обрастателям, и, таким образом, снятия конкурентного воздействия дрейссены на мшанку, обладающую набором особенностей, присущих модульным пресноводным организмам, которые позволили ей быстро освоить освободившееся пространство (разделы 2 и 4).

## **2. Образ жизни и расселение унитарного и модульного обрастателя на примере представителей р. *Dreissena* и *Plumatella***

С 2010-х гг. (см. раздел 1) стала очевидна актуальность прогноза расселения *Plumatella spp.* в техноэкосистемах и пересмотр стратегий предупреждения развития обрастания с учётом того, что применение методов, действенных против дрейссены, может иметь своим побочным эффектом развитие других видов обрастателей<sup>2</sup>.

### **2.1. Общие черты унитарных и модульных беспозвоночных-обрастателей как источников биопомех**

Как эффективность, так и долговременность существования на планете обрастателей, ведущих прикрепленный образ жизни и неспособных на этой стадии своего жизненного цикла существенно менять свое местоположение, предполагает наличие у них свойств, гарантирующих расселение, включая колонизацию новых местообитаний, таких как искусственные системы. Такое свойство у подавляющего их большинства – как унитарных, так и модульных – гетеротопность, то есть существование в виде метапопуляции, часть особей которой обитает в бентали (твёрдые поверхности и дно) водоёма (как правило, поселения прикреплённых взрослых унитарных особей колонии формируют перифитон<sup>3</sup>), а часть, отличающаяся от перифитонных особей кардинально, начиная с морфологии, – обитает в пелагиали (свободноживущие микроскопические пассивно или активно подвижные расселительные особи) (рис. 3 Д-Ж). Именно пелагические популяции, особи которых пребывают в водной толще во взвешенном состоянии и переносятся водными потоками – естественными и техногенными, внутрь технических сооружений и систем, где обеспечивают колонизацию поверхностей *de novo* или пополняют популяции перифитона, уже сформировавшиеся на субстрате, претерпевая после оседания метаморфоз и переходя к донному образу жизни.

Вторая особенность обрастателей, колонизирующих технические объекты, – нетребовательность к источникам питания. Большинство этих видов – фильтраторы, использующие в пищу сестон, который они извлекают из водной толщи различными способами. Таковы наиболее распространенные в выборке водоёмов дрейссена и плюмателла. Часть обрастателей-беспозвоночных – зоопланктофаги, питающиеся

личинками других обрастателей и иными группами зоопланктона, так как это характерно для кордилофоры (*C. caspia*) (рис. 2, 3).

Общность биологических свойств обрастателей, обнаруженных в выборке объектов, – в их высокой устойчивости к различным воздействиям абиотических факторов среды, таких как температура и минерализация воды, способность адаптироваться к изменениям окружающей среды, связанным с эксплуатацией объектов энергетики [16].

На этом принципиальное сходство между двумя группами организмов-обрастателей – типичного унитарного и типичного модульного, обладающего способностью к вегетативному размножению, заканчивается.

## **2.2. Сравнительная характеристика особенностей биологии *Plumatella*, предрасполагающих ее к колонизации техноэкосистем в современных условиях**

Если у дрейссены пелагическая часть метапопуляции представлена только личинками – продуктом рекомбинантного размножения, что характерно для морских обрастателей и видов недавнего морского происхождения, способных заселять и континентальные водоёмы, то у плюмателлы эта часть метапопуляции представлена не только личинками, но также и (или) покоящимися (находящимися в диапаузе и не проявляющие признаков жизни до выхода из состояния покоя) почками – продуктом вегетативного размножения, зооидами-основателями колоний и групповой формой – агрегациями вылупившихся зооидов-основателей колонии (рис. 3, 4). Популяция дрейссены, развивающаяся на субстрате, представлена только активной унитарной формой – результатом метаморфоза личинки (рис. 3, 4), которая формирует группы (агрегации) – друзы, щётки (рис. 3 А). Аналогичная популяция мшанки включает в себя и активных модульных особей (колонии), и зооидов-основателей колоний, и покоящихся унитарных особей – сидячую разновидность статобласта – сессобластов; при наличии на субстрате зрелой колонии – существенная часть статобластов – и сессобластов, и флотобластов – находится внутри нее (рис. 3 и 4 Ж, верхний ряд).

Пребывание в покое занимает существенную часть жизни унитарных вегетативных особей-статобластов, которые в таком состоянии могут переживать неблагоприятные условия, связанные с технологическим циклом, проводимыми противообрастательными мероприятиями и природными явлениями, включая сезонность, будучи уже прикрепленными к поверхности (сессобласты) или переносимыми в потоках воды и в поверхностной плёнке (флотобласты) (рис. 4 Ж).

Факторы перехода спящих статобластов к активной фазе – формированию колонии – пока изучены недостаточно, равно как механизмы и феноменология пробуждения статобластов и реализации ими различных сценариев дальнейшего развития и расселения.

Результаты исследований, выполненных в лабораторных условиях в июне 2017 г. в условиях длинного дня, на флотовластах *P. emarginata*, прошедших яровизацию промораживанием (имитацией естественных условий, инициирующих пробуждение в природной зоне умеренного климата), показали многовариантность их массового (более 70 %) выхода из состояния покоя [17]. Небольшое число (1–5 %) флотовластов *P. geimermassardi* способны к активации без промораживания в год их формирования. Менее 1 % флотовластов *P. emarginata*, прошедших яровизацию промораживанием, удалось активировать в декабре 2016 г., в условиях минимальной длины светового дня.

В выборке водоёмов чаще всего появление растущих колоний регистрируется в первой половине лета, однако, однократно [18] после цветения водоёма цианопрокариотой *Chrisosporium ovalisporum* был отмечен массовый выход сессобластов *P. emarginata* из диапаузы во внеурочное время – осенью. Возможно, цианотоксины являются одним из факторов, способствующих массовому выходу плюмателлы из диапаузы независимо от полноты прохождения фазы покоя.

По-видимому, дополнительное значение в расселении плюмателлы играет транслокация прикреплённой модульной формы при её массовой фрагментации (рис. 3-5). Очевидно, одной из причин фрагментации может быть накопление в колониях зрелых статобластов. Массовая фрагментация зрелых колоний мшанки аналогична наблюдаемому в прибрежье Финского залива массовому всплыванию и отрыву фрагментов зелёных нитчатых водорослей р. *Cladophora* от базальных частей таллома за счет формирования газовых вакуолей перед штормовой погодой, с последующим разносом фрагментов по акватории. Расселение отдельными особями-транслокантами (как правило, молодыми, способными к самостоятельному откреплению от субстрата) возможно и у дрейссены [10].

Важное значение для успеха экспансии по поверхности субстрата при сходных экологических требованиях и жизненной форме обрастателя играет скорость его роста. В ходе наблюдений за приростом биомассы в одних и тех же условиях при совместном обитании двух модульных организмов – *C. caspia* (зоопланктофаг) и *P. emarginata* (фильтратор), выяснилось, что существенно выше скорость роста биомассы колонии мшанки (рис. 5 А). Примечательно и наблюдение за резким падением биомассы мшанки, случившимся через месяц после начала наблюдений, которое, возможно, представляет собой *пример (само) фрагментации части колонии по мере накопления в ней достаточного количества статобластов*. Это можно трактовать как механизм высвобождения зрелых статобластов при фрагментации и, возможно, расселения фрагментами колоний с током воды, как указано выше. Подтверждением трактовки может служить *накопление свободных (находящихся вне колоний) флотовластов* на различных поверхностях в месте экспозиции пластин и частично пустых фрагментов колоний (рис. 5 Б). Возможно, таким образом

достигается быстрое формирование банка покоящихся вегетативных почек нескольких поколений непосредственно в системе.

Стратегические возможности модульной плюмателлы в освоении пространства техноэкосистемы в силу многовариантности жизненных форм и развития, двух типов размножения (рис. 4), сходства с растениями, формирующими семена<sup>2</sup>, должны быть существенно шире, чем у унитарной дрейссены. Выявленная многовариантность характеризуется и динамичностью: помимо смены типа размножения (рекомбинантное и вегетативное) на разных этапах своего развития плюмателла осуществляет переходы от унитарной формы к модульной и групповой, причём без заметной привязки к какому-либо одному внешнему фактору. Напротив, размножение дрейссены (переход от существования на субстрате к пелагическому, сохраняет зависимость от температуры окружающей среды и в техноэкосистемах [11, 16]. Способность плюмателлы к формированию банка покоящихся статобластов (рис. 5 Б), при неодновременности их пробуждения в одном и том же поколении, дает возможность использовать для развития активной фазы длительный период времени.

Существенным преимуществом дрейссены в сравнении с плюмателлой является её способ извлечения пищи из воды путём прокачивания существенных объёмов через мантийную полость, и последующей сортировки всей извлечённой взвеси на жаберном аппарате [11]. Скорость фильтрации *D. polymorpha* – одна из наиболее высоких для двустворчатых моллюсков, обитающих в континентальных водоёмах [19]. Зооиды плюмателлы ограничены по глубине переработки водного потока, осуществляют лишь прямой захват пищевых частиц щупальцами, что ограничивает объём облавливаемой воды слоем, прилежащим непосредственно к зооиду.

Промежуточной можно считать стратегию размножения, развития и расселения колониального гидроидного полипа *C. caspia* (рис. 3 В). Считается, что расселение модульной кордилофоры осуществляется на унитарной стадии личинки – планулы – результата полового (рекомбинантного) размножения. Однако у гидроидов происходит и вегетативное размножение фрустулами – механизм, обеспечивающий клонирование и позволяющий в условиях неблагоприятных для полового размножения существовать (воспроизводиться), эффективно расселяться и колонизировать доступные биотопы. Этот механизм распространён у высокобореальных популяций видов рода *Obelia* [20]. Нельзя исключить такой способ и у *C. caspia*. [16, 17]. Сближает кордилофору с мшанкой и наличие цист, в которые могут трансформироваться планулы при наступлении неблагоприятных условий – а таковыми можно считать, в том числе, и противообратательные химические и физико-химические обработки. Что касается трофологических характеристик вида, то для него характерна полная зависимость от источника пищи – зоопланктона, в связи

чем, в умеренных широтах присутствие живых колоний кордилофоры в обрастании носит сезонный характер.

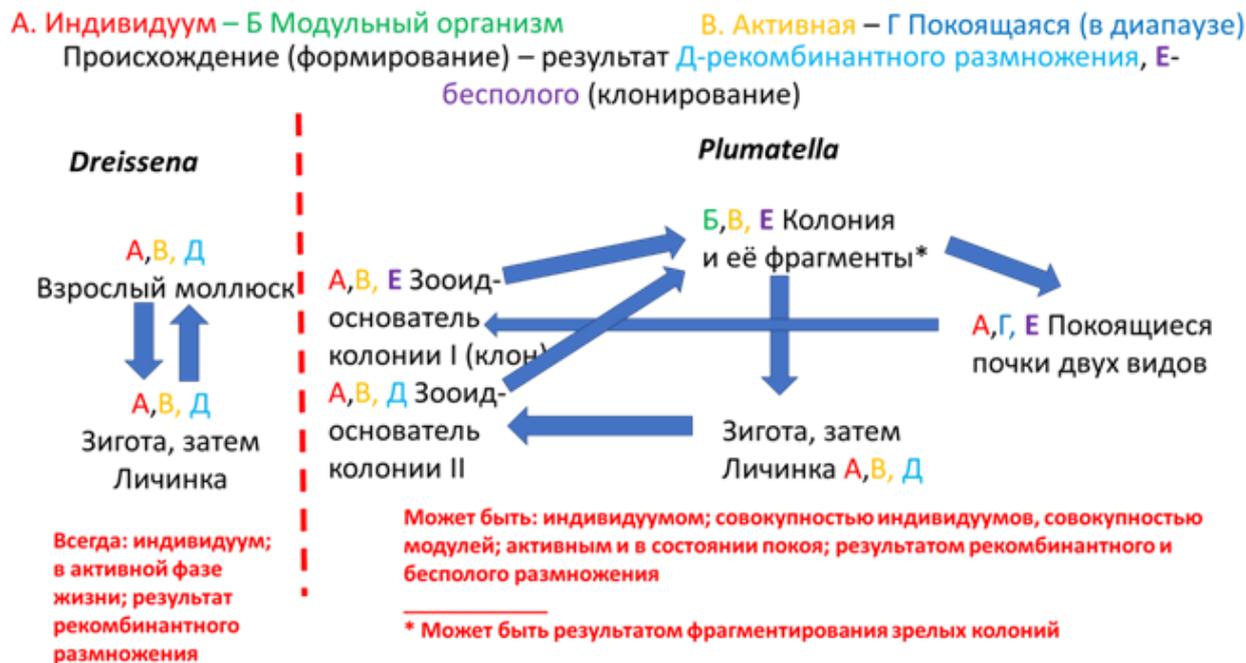


Рис. 4. Варианты особей дрейссены и мшанки *Plumatella*, отвечающих трём параметрам: тип особи (унитарная, модульная), физиологическое состояние особи (диапауза, активность), тип размножения (рекомбинантное (половое), клонирование (вегетативное))

### 2.3. Характеристика массовых видов обрастателей СТВ с фильтрационным типом питания по Раменскому-Грайму

Мшанки проявляют все три стратегии<sup>2</sup>, включая эксплерентную, свойственную рудеральным растениям, тогда как у дрейссены скорее выражена стратегия виолента.

### 3. Вариативность реакции статобластов и зооидов-основателей колоний на воздействии УФ-облучения

Ультрафиолетовое излучение (УФ) – один из универсальных, доступных и экологически приемлемых дезинфектантов, в том числе для использования в комбинации с другими технологиями с целью профилактики развития обрастания при воздействии на расселительные пелагические стадии, находящиеся в водном потоке [13, 21, 22]. Однако в исследовании, предпринятом для проверки предположения о возможностях использования регуляции жизненного цикла как одного из биологически обоснованных подходов к контролю развития мшанки на оборудовании [17, 23], он, прежде всего, рассматривался как фактор, способный оказывать влияние

на пробуждение покоящихся стадий и для принципиальной оценки возможностей репарации повреждений зооидами.

А.



Б.

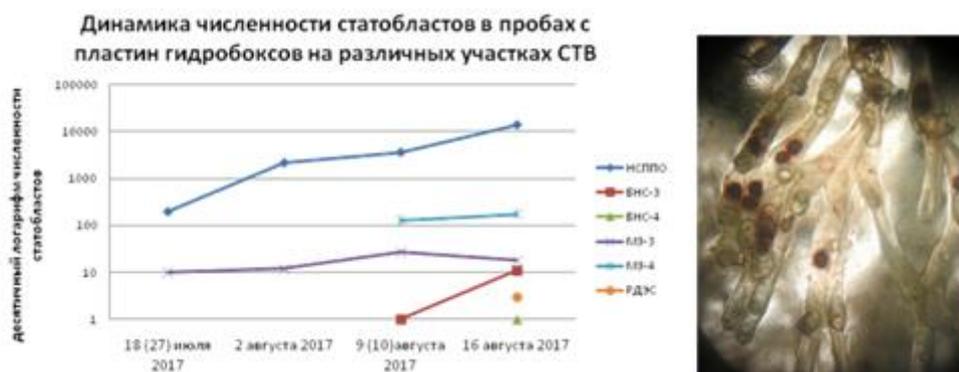


Рис. 5. Результаты наблюдения за динамикой биомассы модульных обрастателей на искусственных субстратах в течение 1 месяца (А) и динамикой численности статобластов в месте экспозиции пластин с развивающимися колониями *Plumatella* (Б)

Разные типы УФ (экспозиция под монохроматической и широкополосной лампами) и их разные дозы (продолжительность экспозиции), примененные однократно, позволяют обеспечить следующие варианты эффектов от воздействия на флотобласты *P. emarginata*:

- временное подавление пробуждения (в практическом отношении эта отсрочка (в зависимости от протяженности критического отрезка хода технической воды) могла бы обеспечивать прекращение заселения твердых субстратов внутри самой станции);

- отсрочка прорастания, но сопряжённая с последующим массовым и дружным выходом зооидов из флотобластов и, таким образом, получение более чувствительной мишени – зооидов;

– прорастание флотовластов с постепенным замиранием дальнейшего развития вылупляющихся из них зооидов.

Для зооидов все типы оказанных воздействий неблагоприятны, их эффект сохраняется или нарастает после прекращения воздействия в течение суток в большинстве вариантов обработки, однако, затем, в течение последующих 2,5 - 4,0 суток после прекращения воздействия, возможно частичное восстановление жизнедеятельности существенной части особей на фоне вылупления новых зооидов из облученных флотовластов, оказавшихся устойчивыми к нему, либо (такое тоже нельзя исключить) простимулированных ультрафиолетовым излучением к пробуждению.

Таким образом, ожидаемое биоцидное и биостатическое воздействие УФ различной части спектра и продолжительности [17, 23] заметнее проявлялось в отношении зооидов – активной унитарной стадии жизненного цикла. Однако тотального уничтожения зооидов воздействие данным фактором при его однократном применении даже в лабораторных условиях, которые снимают все ограничения метода в реальной обстановке технического объекта, не гарантирует.

#### **4. Особенности планирования подхода к защите объекта от мшанкового обрастания**

Исследование показало, что несмотря на совместное обитание конкретных видов-источников биопомех, относимых к одной экологической группировке, их возможности в части размножения развития, роста, механизмов колонизации технического объекта существенно различаются, и при выпадении из сообщества перифитона дрейссены, проявляющей свойства виолента, ей на смену может приходиться обрастатель, обладающий многовариантной стратегией расселения и свойствами эксплерента (плюмателла).

Плюмателла в силу того, что: (1) в основе её размножения и расселения лежит процесс бесполого размножения путём внутреннего почкования, результат которого – устойчивые к большинству воздействий покоящиеся вегетативные почки – статобласты; (2) часть (и весьма значительная) этих устойчивых к различным воздействиям образований остается после их выхода из зрелых и отмирающих колоний на оборудовании в виде «пыли» и в донных отложениях водоёма-охладителя (флотовласты), а также в прикрепленном состоянии (сессобласты) непосредственно на конструкционных материалах и, таким образом, они присутствуют в системах круглогодично и в значительных количествах; (3) у неё имеются множественные механизмы выхода из диапаузы и расселения (флотирующие агрегации зооидов-основателей колоний, фрагменты колоний, банк вегетативных почек на оборудовании и в водоёме) на фоне (4) явной недостаточности знаний о факторах-триггерах

активации пробуждения в техногенных условиях и механизмов приспособления мшанки к таким условиям, требует не столько более сложного комплекса мер защиты, нежели традиционные обрастатели (виоленты), размножающиеся только половым путём и расселяющиеся на стадии личинки, сколько дополнения комплекса специфическими подходами.

Один из возможных подходов заключается в управлении ключевым этапом жизненного цикла *Plumatella*, а именно, выходом из диапаузы путём целевого воздействия на статобласты, которое предположительно приведет либо к их выходу из состояния покоя путём провокации вылупления зооидов – основателей колоний, либо к подавлению такой активности. Если происходит массовое, спровоцированное целевым воздействием, т.е. приуроченное к определённому времени и локальности системы, вылупление зооидов, то уже к этой активной и более уязвимой стадии жизненного цикла можно локально (на конкретном участке) или генерализовано (через водный поток) применить биоцидные или биостатические средства. То есть, подход к контролю мшанкового обрастания на стадии статобласта носит двухступенчатый характер и состоит из ступени пробуждения статобласта и ступени подавления (уничтожения) зооида.

## Примечания

---

<sup>1</sup> Накопленные знания свидетельствуют о том, что биологические инвазии – это не случайный, но вполне поддающийся изучению и прогнозированию, объективный комплекс явлений и событий, способствующих расселению специфической категории эврибионтных видов, обладающих различными преадаптациями, например, наличием личинок, способностью к клонированию, колониальным образом жизни, сравнительно высокой по сравнению с аборигенными видами теплоустойчивостью. Эти свойства особенно успешно реализуются такими организмами в техногенно-трансформированных и искусственных местообитаниях, недоступных аборигенным видам. Соответственно, сами трансформации экосистем под влиянием техногенного фактора формируют в них: (1) новые местообитания, пригодные для натурализации и последующей интеграции вышеописанных вселенцев даже не столько в локальные естественные сообщества, сколько с формированием целых фрагментов сообществ, состоящих из чужеродных элементов (рис. 2), как это имеет место и в обрастании гидротехнических сооружений; (2) за счёт снятия географических и экологических барьеров устойчивые инвазионные коридоры (пространство, где реализуется группа предпосылок, связанных с многократным, направленным заносом инокуляционных популяций вселенцев в водоём-реципиент, что в случае эффективных мер борьбы с нежелательными видами будет гарантировать постоянное пополнение материалом для последующей реколонизации). Немаловажно и то обстоятельство, что большинство вселенцев, становящихся источником биопомех, имеет существенные отличия жизненного цикла в сравнении с аборигенными видами, способными занимать те же экологические

---

ниши, а именно морской жизненный цикл со свободноживущей личинкой или разносимыми с током воды покоящимися стадиями (рис. 3), наличие которых является главной преадаптацией к обеспечению успешного заноса в гидротехнические сооружения.

<sup>2</sup> Речь идёт о системе Раменского – Грайма в части описания отношения организмов к двум факторам – к обеспеченности ресурсами и к нарушениям [24]. Нарушением является результат действия любого внешнего по отношению к экосистеме фактора, который вызывает разрушение её части или уничтожает её целиком. Факторами нарушения являются биологические воздействия (интенсивный выпас скота (особенно в лесу)), антропогенные – распашка целинной степи, проход тяжёлой техники в тундре и т.д., в случае планирования мер защиты – уничтожение биоплёнки, прямое воздействие на организмы-мишени. Жизненные стратегии пионерных организмов, которыми являются многие беспозвоночные – источники биопомех определены как: эксплеренты, виоленты, пациенты. Главным образом, в контексте данного исследования, интерес представляют эксплеренты или рудералы – виды, которые, не будучи конкурентно сильными, занимают места, освобождающиеся после естественной гибели или уничтожения других видов, но быстро уступают им место при наступлении благоприятных условий, и виды, стратегия которых не может быть охарактеризована однозначно.

<sup>3</sup> Под *биопомехами* понимаются нарушения в работе технических объектов, прямо или косвенно связанные с развитием внутри или вблизи них поселений живых организмов. Частный случай биопомех – *биоповреждение (биодеструкция)* – физическое разрушение материалов и объектов вследствие жизнедеятельности организмов и их групп. Независимо от конкретного источника биопомех, потенциальные следствия его неконтролируемого развития – убытки, нарушение технологического цикла, вывод из строя элементов оборудования и конструкций в целом, вплоть до фатального исхода, например, по данным [25].

<sup>4</sup> Техноэкосистема может быть определена как совокупность биотопов природного и техноантропогенного характера, их живого населения, объединённых системой прямых и обратных связей, потоками вещества, энергии и информации, изменяющихся в пространстве и во времени [26]. Применительно к объекту энергетики в состав техноэкосистемы мы, вслед цитированным источником, включаем не только элементы оборудования техногенного объекта, взаимодействующие с водой водоёма – источника водоснабжения, но также и сам водоём в той его части, которая охвачена техногенной циркуляцией и отоплением и является основным источником расселительных стадий гидробионтов, развитие которых в водоёме и на оборудовании зависит от эксплуатации технического объекта.

<sup>5</sup> Наиболее распространенные *источники биопомех* – разнотипные поселения, формируемые организмами-*обрастателями* на границе раздела фаз. В ключевых частях систем охлаждения и технического (сервисного) водоснабжения многих объектов тепловой и атомной энергетики в водной среде это раздел «твёрдое тело – жидкость». К этому разделу

---

может добавляться воздушная и воздушно-капельная фазы, как это наблюдается в больших испарительных градирнях, а в природной части системы технического водоснабжения (СТВ) – водоёмах-источниках водоснабжения и резервуарах для сброса отработанной воды – зона сугубых мелководий, прибой и заплеска. Как правило, такие виды и организмы не рассматриваются в качестве предмета исследований по биобезопасности, в отличие от патогенов, сельскохозяйственных вредителей (однако, и теми, и другими вселенцы могут становиться) или в качестве ресурсных (хотя, по сути, могут таковыми являться наряду с преднамеренно интродуцированными видами или породами и сортами сельскохозяйственных животных и растений), однако, их практическое значение трудно переоценить. (Био)обрастание, также перифитон – экотопическая группировка гидробионтов (растений, животных, микроорганизмов), ведущих преимущественно прикрепленный образ жизни на разделе вода – твердые субстраты различного происхождения его присутствие на поверхностях есть результат взаимодействия физических, химических и биологических процессов. Термин впервые введен в 1924 г. А.Л. Бенингом [26]. Обрастание часто подразделяют на микрообрастание (*обрастание, вызванное микроорганизмами, также используются термины «биоплёнка», «микроплёнка», «biofilm»*), микроперифитон (*обрастание, вызванное микроводорослями*), фитоперифитон (*обрастание, вызванное прикрепленными растениями, главным образом нитчатыми водорослями*), зообрастание или зооперифитон (*обрастание, сформированное многоклеточными беспозвоночными животными, ведущими прикрепленный образ жизни*) широко распространены в водных экосистемах. В естественных водоёмах обрастание развивается на дне, вблизи дна и в толще воды на твердых субстратах. В техноэкосистемах, включая гидротехнические и водозаборные сооружения, внутренние участки систем технического водоснабжения, обрастание распространено там, где есть приемлемые условия для жизни входящих в его состав организмов.

Публикация подготовлена в рамках выполнения Государственного задания Минобрнауки России № 075-01351-23ПР на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов от 27 декабря 2022 года Санкт-Петербургскому научному центру РАН, тема FWGF-2019-0001 (М.И. Орлова).

## Литература

1. Алимов А.Ф., Богуцкая Н.Г., Орлова М.И., Резник С.Я., Кравченко О.Е., Паевский Д.А., Гельтман Д.В. и др. Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах – М.: Товарищество научных изданий КМК. 2004.

2. Mackie G., Claudi R. (eds.). Monitoring and control of macrofouling mollusks in fresh water systems. Second edition. CRC Press. 2013.

3. Вернадский В.И. О размножении организмов и его значении в механизме биосферы. Статья первая // Известия Российской академии наук. Серия математическая. 1926. Т. 20 (9). С. 697–726.

4. Дгебуадзе Ю.Ю., Петросян В.Г., Хляп Л.А. (ред.) Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100) – М.: Товарищество научных изданий КМК. 2018.
5. Орлова М.И., Строгова Е.В., Кузьмин В.В. Гидротехника и биопомехи: к познанию биологии мшанки рода плюмателла в условиях техногенно-трансформированных водоёмов и искусственных экосистем объектов энергетики // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2022. Т 306. С. 79-98.
6. Информационный справочник по гидротехническим сооружениям АЭС. – М., 2010.
7. Региональная экология. 2015а. № 3(38). Региональная экология. 2015б. № 4(39).
8. Гонтарь В.И. Описание первой находки пресноводной мшанки *Plumatella geimermassardi* Wood & Okamura, 2004 *Phylactolaemata* в Копорской губе восточной части Финского залива // Региональная экология. 2016. (1). С. 57– 62.
9. Гонтарь В.И. Описание первой находки пресноводной мшанки *Plumatella similirepens* Wood, 2001 (Bryozoa, Phylactolaemata) в озере Удомля, Тверская область // Региональная экология. 2018. № 1 (50). С. 60–66. DOI:10.30694/1026-5600-2018-1-60-66.
10. Claudi R., Mackie G.L. Practical manual for zebra mussel monitoring and control. Lewis Publishers, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo 1993.
11. Дрейссена: *Dreissena polymorpha* (Pall.) (Bivalvia, Dreissenidae): систематика, экология, практическое значение / Я.И. Старобогатов (ред.) – М.: Наука. 1994.
12. МТ 1.2.1.15.1043-2015. Методика ведения биолого-химического мониторинга систем циркуляционного и технического водоснабжения АЭС. – М.: Концерн Росэнергоатом, 2015.
13. Pucherelli S., Claudi R. Assessment of UV Irradiation Effect on Downstream Settlement of Colonial Hydroid *Cordylophora caspia* // ICAIS 2017, Abstracts. p. 126.
14. Орлова М.И. Серая книга Российского сектора Балтийского моря. В 5-ти томах. Том 1. Восточная часть Финского залива. Водные беспозвоночные: Hydrozoa, Mollusca, Polychaeta, Crustacea (Cirripedia), Bryozoa / монография / М.И. Орлова. – СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2022.
15. Бутакова Е.А., Павлюк Т.Е., Ушаков О.С., Попов А.Н., Тютков О.В. К вопросу об альголизации водоёмов. Водное хозяйство России, №5 2013, СС. 75-84.
16. Орлова М.И., Строгова Е.В., Литвинчук Л.Ф., Досмедов И.Х., Кузьмин В.В. Результаты наблюдений за сезонной динамикой личинок Dreissenidae в водоёмах охладителях: эксплуатация электростанции и стратегия выживания // Региональная экология. 2016. № 1(43). С. 41–56.

17. Орлова М.И., Строгова Е.В., Личи Т., Лурье М.А. К стратегиям защиты систем циркуляционного и технического водоснабжения (СТВ) от обрастания колониальными беспозвоночными с покоящейся стадией в жизненном цикле: *Plumatella emarginata* (Tentaculata) и ультрафиолетовое излучение UV - контроль vs уничтожение. Часть I. Новые данные о выходе из диапаузы и их применение для экологического мониторинга СТВ // Региональная экология, 2018. № 51 (1). С. 31–43 <https://DOI:10.30694/1026-5600-2018-1-31-43>.

18. Инженерно-техническое сопровождение работ по биолого-химическому мониторингу систем циркуляционного и технического водоснабжения. Анализ годовых отчётов АЭС по биолого-химическому мониторингу систем циркуляционного и технического водоснабжения, разработка рекомендаций по борьбе с биопомехами: приложение к техническому отчёту по договору 2010590016/Б2017/72/ 2017-КА от 01.08.2017. Санкт-Петербург, 2017.

19. Алимов А.Ф. Функциональная экология пресноводных двустворчатых моллюсков. – Л.: Наука, 1981.

20. Slobodov S.A., Marfenin N.N. The features of reproduction of *Obelia* spp. In the White Sea // Oceanology. 2005. Т. 45. № 1. С. 69-75.

21. McGivney E., Carlsson M., Gustafsson J.P., Gorokhova E. Effects of UV-C and Vacuum-UV TiO<sub>2</sub> Advanced Oxidation Processes on the Acute Mortality of Microalgae // Photocemistry and Photobiology, 2015.

22. Pucherelli S., Claudi R., Prescott T. Control of biofouling in hydropower cooling systems using HOD ultraviolet light Bureau of Reclamation // PO Box 25007, Denver, CO 80225, USA 2 RNT Consulting INC., 823 County Road 35, RR#2, Picton, Ontario KOK 2T0, 29 October 2018.

23. Орлова М.И., Строгова Е.В., Личи Т., Лурье М.А. К стратегиям защиты систем циркуляционного и технического водоснабжения (СТВ) от обрастания колониальными беспозвоночными с покоящейся стадией в жизненном цикле: *Plumatella emarginata* (Tentaculata) и ультрафиолетовое излучение UV - контроль vs уничтожение. Часть 2. Реакции статобластов и зооидов на облучение ультрафиолетовыми лампами среднего и низкого давления // Региональная экология, 2018 б. № 51 (1), С. 44–59 DOI: 10.30694/1026-5600- 2018-1-44-5.

24. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Основы общей биологии: Учебное пособие / Под ред. Г.С. Розенберга. – М.: Университетская книга, 2005.

25. Звягинцев А.Ю. Морское обрастание в северо-западной части Тихого Океана. – Владивосток: Дальнаука, 2005. 432 с.

26. Протасов А. А. Перифитон как экотопическая группировка гидробионтов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2010, Т. 3, № 1. – С. 40-56. ISSN 1997-1389.