

УДК 574.58

МНОГОЛЕТНЯЯ СУКЦЕССИЯ В СООБЩЕСТВЕ ОБРАСТАНИЯ ПОДВОДНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В АФОТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ОХОТСКОГО МОРЯ

© 2023 г. А. И. Чава^{1,*}, В. О. Мокиевский¹

Представлено академиком РАН М. В. Флинтом 09.09.2022 г.

Поступило 09.09.2022 г.

После доработки 03.10.2022 г.

Принято к публикации 06.10.2022 г.

На основании данных, полученных с помощью регулярных видеосъемок на юго-западном шельфе Охотского моря на глубине 80–90 м, описан 10-летний сукцессионный процесс в сообществе обрастания подводных технических сооружений. Составлено описание стадий развития обрастания с шагом в 1–2 года как для интактного сообщества, так и для участков, подвергшихся одно- или многократной гидродинамической чистке. Для каждой стадии определены до наименьшего возможного таксона характерные виды-доминанты, а также проективное покрытие обрастания. Первые два года в развитии интактного сообщества характеризуются низкими проективными покрытиями (до 50%), на третий год и далее наблюдается резкий рост численности и разнообразия макрообрастателей. Среди доминирующих видов в сообществе старше двух лет отмечены усонogie раки *Chirona evertmanni*, губки *Phakellia* sp., мшанки *Securiflustra securifrons* и асцидии *Boltenia ovifera*. Ранние стадии восстановительной сукцессии отличаются от интактной соотношением доминирующих видов и более высокими скоростями развития сплошного покрова макрообрастания.

Ключевые слова: обрастание, сукцессия, подводная видеосъемка

DOI: 10.31857/S2686739722601946, **EDN:** GIQIOJ

Любой объект, оказавшийся в морской воде, будь то кусочек микропластика или многокилометровый трубопровод, за считанные минуты становится субстратом для организмов-обрастателей. Собирательное понятие обрастания включает в себя как микроорганизмов – бактерий и одноклеточных эукариот, образующих первичную биопленку, так и макроорганизмов, оседающих на нее – макрофитов и различных групп прикрепленных беспозвоночных. В процессе развития сообщества соотношение микро- и макрообрастателей меняется, как меняется и видовой состав внутри каждой из этих групп. Как и в наземных фитоценозах, в сообществах морского обрастания подобные изменения в качественном и количественном составе нередко происходят последовательно и закономерно, т.е. представляют собой сукцессию.

Исследования, посвященные сукцессионным процессам в морском обрастании, носят спорадический характер. Существует немало работ,

описывающих последовательную смену сообществ в отдельных районах Мирового океана (например, [1, 2]), однако до сих пор не существует целостного представления о том, как именно меняются закономерности развития обрастания с изменением глубины, температуры, солености и других факторов, потенциально влияющих на жизнедеятельность организмов, входящих в состав этих сообществ. Более того, сама концепция сукцессионной смены сообществ в обрастании ставится под сомнение некоторыми исследователями [3].

Изучение развития сообществ морского обрастания является важной прикладной задачей, поскольку организмы-обрастатели оказывают влияние на многие отрасли человеческой деятельности, такие как судоходство, нефтегазовая промышленность и гидроэнергетика. Большинство работ по изучению обрастаний естественных и искусственных субстратов выполнены на глубинах до 30 м, и лишь в последние годы с увеличением промышленной активности в более глубоководных районах Мирового океана появляется все больше работ, посвященных обрастаниям на глубинах, превышающих первые десятки метров [4–6].

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: cribrilina@gmail.com

С увеличением глубины изменяется множество параметров, способных повлиять на скорость сукцессионного процесса в обрастании, а также на состав каждой стадии. Например, снижение освещенности означает уменьшение доли макро- и микрофитов в обрастании [7, 8], а также снижение продукции фитопланктона [9]. Также с глубиной изменяется качественный и количественный состав планктонных личинок [10], а доля потенциальных обрастателей в планктоне уменьшается, поскольку снижается количество доступного твердого субстрата и, соответственно, прикрепленных организмов, которые могут производить потомство.

Существует крайне мало информации об обрастании искусственных сооружений в нижних отделах шельфа в дальневосточных морях в целом, и в Охотском море в частности. Исследования прошлых лет были посвящены обрастанию корпусов судов [11, 12], гидротехнических сооружений [13], буев навигационного ограждения [14] и других объектов, расположенных не глубже 30–40 м. Информация об обрастании искусственных субстратов на больших глубинах в Охотском море отсутствует.

Одним из немногих доступных способов изучения сообществ обрастания на глубинах, превышающих водолазные (глубже 40–60 м), является подводная видеосъемка, осуществляемая с помощью телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА). Данные аппараты применяются для регулярного технического обслуживания различных антропогенных конструкций под водой, в ходе которого видеосъемка ведется практически непрерывно. Этот “побочный продукт” работы ТНПА позволяет наблюдать за развитием интактных сообществ обрастания на одних и тех же объектах в течение нескольких лет, а также следить за восстановительной сукцессией на регулярно очищаемых объектах. В данной работе мы наблюдали за развитием сообщества обрастания на технических сооружениях, расположенных в юго-западной части Охотского моря на глубине 80–90 м. Мы предположили, что как интактное, так и нарушенное гидродинамической чисткой сообщество обрастаний развиваются с предсказуемой скоростью и проходят несколько повторяемых стадий, которые могут быть скомпонованы в единой схеме развития данных сообществ.

В качестве основного метода оценки параметров биологического обрастания был использован метод визуального анализа видеозаписей, полученных с ТНПА. В процессе обследования технических сооружений аппараты двигались с разной скоростью и снимали на две, иногда три камеры с разным увеличением и углом обзора, позволяя получить видеоданные от обзорных до детальных.

При просмотре мы регистрировали основные группы организмов и их обилие. В качестве меры обилия использовали проективное покрытие обрастателей – процент площади, занятый организмами при взгляде сверху (от 0 до 100%, 100+ для многоярусных сообществ). Информация о сроках установки и очистки отдельных элементов конструкций позволила описать процесс интактного обрастания на протяжении десяти лет (2011–2021 гг.) с дискретностью от одного до трех лет. Также на основании видеоданных о регулярной гидродинамической чистке был описан процесс восстановления сообщества за 2 года с дискретностью в один год. В ходе анализа мы опирались на видеозаписи подводных обследований технических сооружений в 2016, 2018, 2019 и 2021 г. Видовые определения массовых форм подкреплены качественными сборами поднятых на поверхность элементов конструкций.

В составе обрастаний присутствовали характерные для твердых субстратов группы организмов такие, как мшанки, гидроидные полипы, губки, асцидии и усонogie раки. Нам удалось выделить указанные на рис. 1 этапы развития обрастаний для нескольких объектов, установленных в разные годы. Сравнение обрастаний одного возраста с разными начальными датами подтверждает наше предположение о предсказуемых и повторяющихся сукцессионных стадиях в развитии сообщества организмов-обрастателей. Первая стадия (*1–2 года*) характеризуется образованием биопленки и оседанием первых обрастателей, проективное покрытие не превышает 30%, наиболее характерными организмами являются усонogie раки *Chirona evermanni*, а также гидроидные полипы и корковые формы мшанок. Следующая стадия (*3 года*) характеризуется значительным увеличением плотности обрастательного покрова, проективное покрытие в среднем составляет 70–80%, в некоторых местах достигает 100%, осевшие в предыдущие годы усонogie раки увеличиваются в размерах, появляются кустистые формы мшанок (наиболее крупный и характерный вид, хорошо различимый на видеозаписях – *Securiflustra securifrons*). На следующем этапе (*4–5 лет*) структура сообщества становится многоярусной – новые поколения обрастателей оседают на предыдущие, используя известковые структуры домиков *Chirona evermanni* в качестве субстрата, и проективное покрытие превышает 100%. Преобладают усонogie раки, кустистые формы мшанок и гидроидных полипов. Появляются единичные особи организмов, характерных для зрелого сообщества и хорошо различимых на видео: губки *Phakellia* sp., асцидии *Boltenia ovifera* и мягкие кораллы *Gesmeria fruticosa*. Сообщество в возрасте *6–10 лет* характеризуется увеличением доли губок и асцидий, образующих плотные “заросли” наиболее высокого яруса обрастания, увеличивается часто-

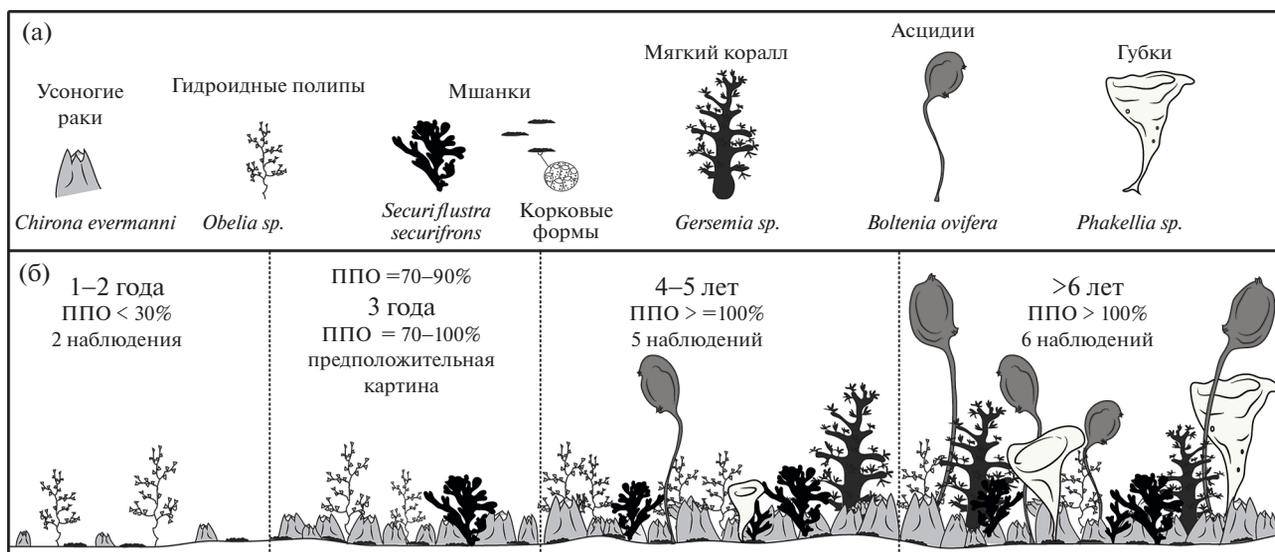


Рис. 1. (а) Организмы, хорошо различимые на видеозаписях и характерные для сообщества обрастания искусственных субстратов в исследуемом районе Охотского моря на глубине 80–90 м; (б) Усредненная схема развития интактного сообщества обрастания в исследуемом биотопе (ппо – проективное покрытие обрастателей).

та встречаемости мягких кораллов, в нижних ярусах сохраняется сплошной покров из усоногих раков, гидроидов и различных форм мшанок, проективное покрытие превышает 100%. На этой стадии достигается максимальное за весь период значение биомассы обрастателей, точную оценку которой можно провести только с помощью многократного количественного пробоотбора. Однако, на основании эмпирических наблюдений (видео- и фотоматериалов) и скудных литературных данных [15] можно предположить, что биомасса интактного сообщества возрастом 3–5 лет составляет от 1 до 10 кг на м² и имеет тенденцию к увеличению в несколько раз за следующие 2–3 года.

Помимо сукцессионного процесса в интактном сообществе, нам удалось проследить восстановительную сукцессию обрастания на участках технических сооружений, подвергавшихся регулярной гидродинамической чистке (рис. 2). Максимальный возраст таких сообществ, присутствовавших на видеозаписях, составляет 2 года. Для удобства сравнения разных участков между собой мы следили за восстановительной сукцессией на ровных горизонтальных поверхностях. Стадии развития восстановительного процесса значительно отличаются от аналогичных по возрасту стадий интактного сообщества – как скоростью образования сплошного покрова обрастателей, так и таксономическим составом стадий. Как и в случае интактного сообщества, мы наблюдали описанные на рис. 2 стадии на объектах с разным временем первоначальной установки и очистных мероприятий.

Поскольку чистка проводилась на объектах с хорошо развитым сообществом обрастания (проективное покрытие более 80%), сразу после очистных мероприятий на субстрате были заметны остатки кальцинированных структур обрастателей, в основном домиков усоногих раков *Ch. evermanni* и обызвествленных колоний корковых мшанок. Через год на очищенных (как впервые, так и повторно) участках образовывался практически сплошной покров *Ch. evermanni* высотой не более 2–2.5 см, проективное покрытие составляло не меньше 70%. Через два года на тех же участках в отсутствие очистных мероприятий ППО достигало 100%, а помимо усоногих раков появились единичные гидроидные полипы (наиболее хорошо заметны на видеозаписях колонии *Obelia sp.*) и мшанки (на видеозаписях различимы небольшие колонии *Securiflustra securifrons*).

Для достижения такой плотности организмов на новой поверхности сообществу требуется не меньше трех лет, в то время как на очищенных горизонтальных поверхностях такая плотность достигается за один-два года.

На сегодняшний день наши знания об общих закономерностях сукцессионного процесса в сообществах обрастания и о влиянии на данные процессы различных факторов внешней среды все еще достаточно фрагментарны. Однако, за счет регулярно появляющихся новых данных из разных точек Мирового океана, постепенно проясняются некоторые особенности развития обрастания в исследуемых точках, например изменение скорости образования сообщества с увеличением глубины. Анализ многолетних видеосъемок с юго-

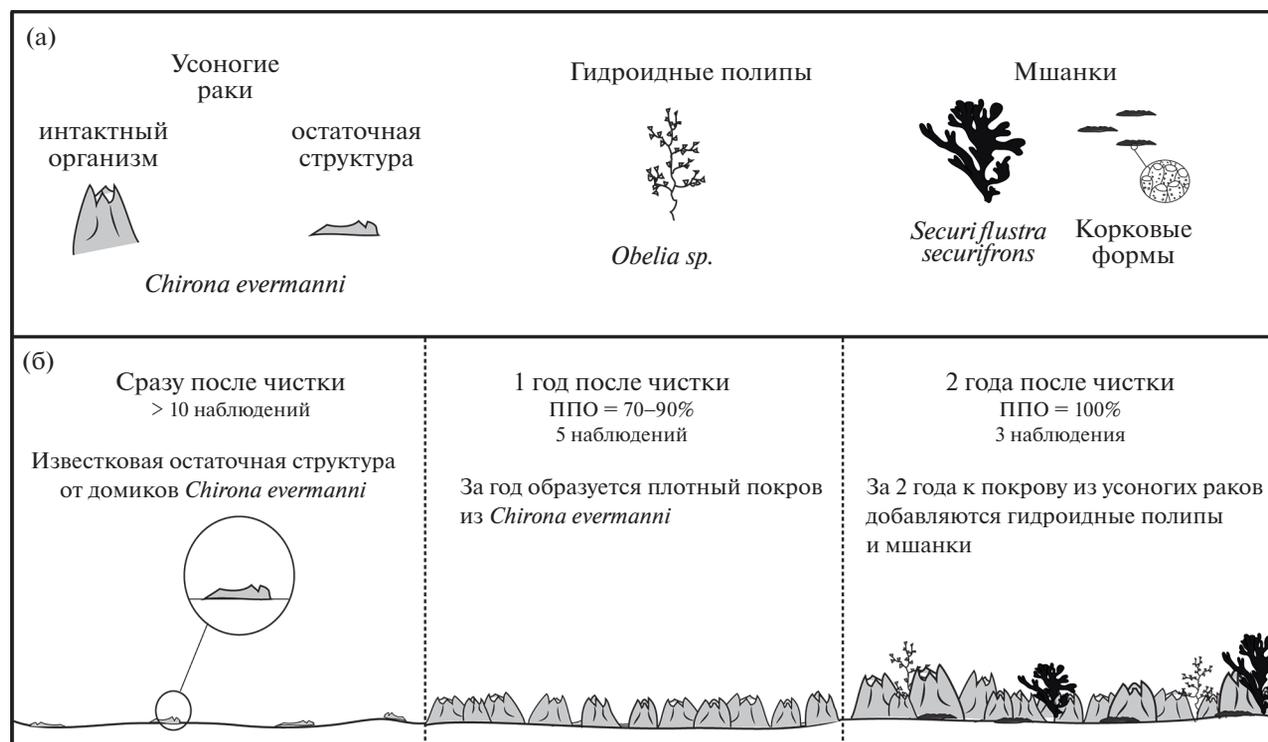


Рис. 2. (а) Организмы, характерные для нарушенного чисткой сообщества обрастания искусственных субстратов в исследуемом районе Охотского моря на глубине 80–90 м; (б) Усредненная схема восстановительной сукцессии сообщества обрастания.

западного шельфа Охотского моря показал, что на глубине 80–90 м в этом районе первые стадии развития обрастания на искусственном субстрате сильно растянуты во времени и занимают около двух лет, после чего начинается резкий рост численности и разнообразия прикрепленных организмов. Для мелководных сообществ в фотической зоне в умеренных широтах продолжительность стадии биопленки и следующих за ней стадий с проективным покрытием ниже 50%, как правило, составляет не больше нескольких недель или месяцев (см. обзор [1]). Подобную “задержку” в исследуемом биотопе можно объяснить несколькими факторами. Во-первых, окружающий естественный субстрат – это илисто-песчаные и песчаные равнины, на которых практически нет ни твердого субстрата, ни характерных для него видов, служащих источником личинок для заселения. Таким образом, все личинки, оседающие на новый антропогенный субстрат, появляются извне, и скорее всего их концентрация изначально мала. Во-вторых, в обрастаниях в афотической зоне полностью отсутствует такой разнообразный и быстрорастущий компонент, как макрофиты, которые в фотической зоне зачастую являются первыми крупными и активными колонизаторами субстрата после микрообраста-

телей. На участках, подвергавшихся чистке, напротив, очень хорошо заметно, как сильно влияет на состав обрастания уже имеющееся рядом сформированное сообщество. Благодаря богатой личинками среде, на очищенных поверхностях без “задержки” образуется сообщество из усоногих раков, которые во многих сообществах твердых грунтов являются первыми крупными поселенцами на свободном субстрате (например, [16]).

Несмотря на то что данная работа основана исключительно на видеоданных, полученная в ходе их анализа информация позволила нам составить не очень детализированную, но четкую схему развития сообщества обрастания на глубинах, исключая любые водолазные экспериментальные работы и делающих пробоотбор затруднительным и дорогостоящим мероприятием. Наш взгляд, использованная в работе методика анализа технических съемок ТНПА может успешно применяться в научных целях для изучения сообществ обрастания в других труднодоступных районах Мирового океана, а предложенная схема развития сообществ может служить отправной точкой для исследования скорости сукцессии обрастаний на глубинах нижнего шельфа в юго-западной части Охотского моря.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Дмитрия Анатольевича Онищенко за помощь и поддержку в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wahl M.* Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: some basic aspects // *Marine ecology progress series*. 1989. V. 58. P. 175–189.
2. *Ошурков В.В.* Сукцессии и динамика эпибентосных сообществ верхней сублиторали бореальных вод. Владивосток.: Дальнаука; 1998.
3. *Clare A.S., Rittschof D., Gerhart D.J., et al.* Molecular approaches to nontoxic antifouling // *Invertebrate Reproduction & Development*. 1992. V. 22. P. 67–76.
4. *Apolinario M., Coutinho R.* Understanding the biofouling of offshore and deep-sea structures / In: *Advances in marine antifouling coatings and technologies*. Woodhead Publishing; 2009. P. 132–147.
5. *Bellou N., Papathanassiou E., Dobretsov S., et al.* The effect of substratum type, orientation and depth on the development of bacterial deep-sea biofilm communities grown on artificial substrata deployed in the Eastern Mediterranean // *Biofouling*. 2012. V. 28. No 2. P. 199–213.
6. *Zhang H., Cao W., Wu Z., et al.* Biofouling on deep-sea submersible buoy systems off Xisha and Dongsha Islands in the northern South China Sea // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2015. V. 104. P. 92–96.
7. *Terry L.A., Picken G.B.* Algal fouling in the North Sea / In: *Evans L.V., Hoaglan K.D.*, editors. *Studies in Environmental Science*. Vol. 28. Amsterdam: Elsevier; 1986. P. 179–192.
8. *Irving A.D., Connell S.D.* Sedimentation and light penetration interact to maintain heterogeneity of subtidal habitats: algal versus invertebrate dominated assemblages // *Marine Ecology Progress Series*. 2002. V. 245. P. 83–91.
9. *Cowie P.R.* Biofouling patterns with depth / In: *Durr S., Thomason J.C.*, editors. *Biofouling*. Oxford: Blackwell Publishing. 2010. P. 87–99.
10. *Gaines S.D., Gaylor D.B., Gerber L.R., et al.* Connecting places: the ecological consequences of dispersal in the sea // *Oceanography*. 2007. V. 20. No 3. P. 90–99.
11. *Звягинцев А.Ю.* Обрастание судов прибрежного и портового плавания в районе острова Сахалин / В кн.: *Бентос и условия его существования на шельфовых зонах Сахалина*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР; 1985. С. 102–116.
12. *Михайлов С.Р., Блинов С.В.* Обрастание судов промышленного флота в Дальневосточном морском бассейне / В кн.: *Организмы обрастания дальневосточных морей*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР; 1981. С. 28–41.
13. *Звягинцев А.Ю.* Исследование обрастания системы охлаждения Владивостокской ТЭЦ-2 / В кн.: *Современные проблемы биологических поврежденных материалов: сб. Материалов VI Всероссийской Научно-практической конференции*. Пенза: Приволжский дом знаний; 2002. С. 69–71.
14. *Зевина Г.Б., Горин А.Н.* Флюктуация усоногих раков в обрастаниях буев залива Петра Великого / В кн.: *Обрастания в Японском и Охотском морях*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР; 1975. С. 71–78.
15. *Звягинцев А.Ю.* Морское обрастание в северо-западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука; 2005.
16. *Andersson M.H., Berggren M., Wilhelmsson D., et al.* Epibenthic colonization of concrete and steel pilings in a cold-temperate embayment: a field experiment // *Helgoland Marine Research*. 2009. V. 63. No 3. P. 249–260.

MULTI-YEAR SUCCESSION OF BIOFOULING COMMUNITIES ON UNDERWATER ARTIFICIAL STRUCTURES IN THE APHOTIC ZONE OF THE SEA OF OKHOTSK

A. I. Chava^{a,#} and V. M. Mokievsky^a

^a*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: cribilina@gmail.com*

Presented by Academician of the RAS M.V. Flint September 9, 2022

A 10-year succession of the fouling community inhabiting underwater manmade structures at a depth of 80–90 m was described using the materials from regular video surveys of the technical installations on the southwestern shelf of the Sea of Okhotsk. A general scheme of macrofouling community developmental stages in steps of 1–2 years has been compiled both for the intact community and for sites subjected to the single or multiple hydrodynamic cleaning. For each stage we visually estimated the projective cover of macrofouling and identified the characteristic dominant species down to the smallest possible taxon. The first two years of the intact community are characterized by low projective cover (up to 50%), in the third year and further there is a sharp increase in the abundance and diversity of macrofouling organisms. Barnacles *Chirona evermanni*, sponges *Phakellia* sp., bryozoans *Securiflustra securifrons*, and ascidians *Boltenia ovifera* were noted among the dominant species in the community older than two years. The early stages of restorative succession differ from the intact succession in terms of dominant species and developmental rates.

Keywords: biofouling, succession, underwater videoshooting