Оригинальная статья / Original article УДК 574.58 DOI: 10.18470/1992-1098-2023-3-133-143

Экология микроорганизмов

CC BY 4.0

Микропластон искусственных полимеров в р. Миасс и оз. Тургояк (Южный Урал, Российская Федерация) на ранних стадиях колонизации

Филипп В. Сапожников¹, Ольга Ю. Калинина², Сергей В. Востоков¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

Контактное лицо

Филипп В. Сапожников, кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник, лаборатория экологии прибрежных донных сообществ, Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук; 117997 Россия, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36. Тел. +79168509816 Email <u>fil aralsky@mail.ru</u> ORCID <u>https://orcid.org/0000-0002-3239-6543</u>

Формат цитирования

Сапожников Ф.В., Калинина О.Ю., Востоков С.В. Микропластон искусственных полимеров в р. Миасс и оз. Тургояк (Южный Урал, Российская Федерация) на ранних стадиях колонизации // Юг России: экология, развитие. 2023. Т.18, N 3. С. 133-143. DOI: 10.18470/1992-1098-2023-3-133-143

Получена 7 августа 2023 г. Прошла рецензирование 17 августа 2023 г. Принята 21 августа 2023 г.

Резюме

Цель. Выявить состав и особенности пространственной структуры микрообрастания (микропластона) на ранних стадиях колонизации поверхностей искусственных полимерных плёнок (ПЭВД) в природных местообитаниях р. Миасс и оз. Тургояк (Южный Урал). Ранние стадии микрообрастания полимеров создают основы для дальнейшего усложнения его пространственной мозаики с учётом микроландшафта поверхности и создаваемых им возможностей расположения компонентов сообщества.

Материалы и методы. Фрагменты полимерных плёнок (ПЭВД) хозяйственно-бытового назначения были собраны на мелководьях р. Миасс и оз. Тургояк в июне 2023 года. Отбирали образцы, экспонировавшиеся в природных водоёмах не менее нескольких месяцев. Анализ состава, структуры и пространственной организации сообществ микропластона проводили методами световой и СЭМмикроскопии.

Результаты. Микропластон на ранних стадиях роста существенно различался для изученных местообитаний. В р. Миасс на ПЭВД-плёнках преобладали сидячие панцирные амёбы (Granofilosea: Microgromiidae), в массе развивались прикреплённые диатомеи (Bacillariophyta: Achnanthaceae, Cocconeidaceae), встречались корковые зелёные микроводоросли (Chlorophyta, Charophyta). В оз. Тургояк – выраженно доминировали корковые зелёные микроводоросли, массово обитали иные диатомеи (Bacillariophyta: Rhopalodiaceae, Cocconeidaceae), а также трихомные И коккоидные формы цианопрокариот (Cyanobacteria: Pseudanabaenaceae, Rivulariaceae, Chamaesiphonaceae, Microcystaceae). Колонизация плёнок отдельными видами различалась для местообитаний, а также зависела от микрорельефа поверхности. Заключение. Анализ микропластона ПЭВД-плёнок в гидрологически

различных местообитаниях продемонстрировал особенности ранней колонизации этих субстратов, биотопоспецифичность видовой и пространственной структуры сообществ, а также организацию колониальных поселений для ряда видов.

Ключевые слова

Микропластон, искусственные полимеры, колонизация пластика, организация сообществ, Южный Урал.

© 2023 Авторы. Юг России: экология, развитие. Это статья открытого доступа в соответствии с условиями Creative Commons Attribution License, которая разрешает использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии правильного цитирования оригинальной работы.

Microplaston artificial polymers in the Miass River and Lake Turgoyak (Southern Urals, Russia) in the early stages of colonisation

Philipp V. Sapozhnikov¹, Olga Yu. Kalinina² and Sergey V. Vostokov¹

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

Principal contact

Philipp V. Sapozhnikov, PhD in Biology, Leading Researcher, Laboratory of the Ecology of Coastal Benthic Communities, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences; 36 Nakhimovsky Prospekt, Moscow, 117997 Russia. Tel. +79168509816 Email <u>fil_aralsky@mail.ru</u> ORCID <u>https://orcid.org/0000-0002-3239-6543</u>

How to cite this article

Sapozhnikov Ph.V., Kalinina O.Y., Vostokov S.V. Microplaston artificial polymers in the Miass River and Lake Turgoyak (Southern Urals, Russia) in the early stages of colonisation. *South of Russia: ecology, development.* 2023, vol. 18, no. 3, pp. 133-143. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2023-3-133-143

Received 7 August 2023 Revised 17 August 2023 Accepted 21 August 2023

Abstract

Aim. To identify the composition and features of the spatial structure of microfouling (microplaston) during the early stages of colonisation of the surfaces of artificial polymer films (LDPE) in the natural habitats of the Miass River and Lake Turgoyak (Southern Urals). The early stages of polymer microfouling which create the basis for further complexity of its spatial mosaic are considered, taking into account the surface microlandscape and the possibilities it creates for the location of community components.

Materials and Methods. Fragments of polymer films (LDPE) manufactured for household use were collected in the waters of the Miass River and Lake Turgoyak in June 2023. Samples were selected that were exposed in natural reservoirs for at least several months. Analysis of the composition, structure and spatial organization of microplastonic communities was carried out using light and SEM microscopy.

Results. The microplaston in the early stages of growth varied significantly among the habitats studied. On LDPE films from the Miass River they were dominated by sessile armored amoebae (Granofilosea: Microgromiidae), attached diatoms (Bacillariophyta: Achnanthaceae, Cocconeidaceae) developed as a mass and encrusting green microalgae (Chlorophyta, Charophyta) were also found. In Lake Turgoyak cortical green microalgae clearly dominated, together with other diatoms (Bacillariophyta: Rhopalodiaceae, Cocconeidaceae). Trichome and coccoid forms of cyanoprokaryotes (Cyanobacteria: Pseudanabaenaceae, Rivulariaceae, Chamaesiphonaceae, Microcystaceae) were also abundant. The colonisation of films by individual species varied among habitats and also depended on the surface microrelief.

Conclusion. Analysis of the microplaston of LDPE films in hydrologically different habitats demonstrated the features of early colonisation of these substrates, the biotope-specificity of the species and spatial structure of communities, as well as the organisation of colonial settlements of a number of species.

Key Words

Microplaston, artificial polymers, colonisation of plastic, community organization, Southern Urals.

© 2023 The authors. *South of Russia: ecology, development*. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

введение

Поверхности пластиковых субстратов, попадающих в природные водные биотопы, постепенно обрастают сообществами живых организмов. Первичная их колонизация происходит с участием бактерий, микроводорослей, протистов и других микроорганизмов [1; 2]. Биоплёнки, формирующиеся на самых разных искусственных полимерах (микропластон), отличаются по характеристикам от сообществ, населяющих твёрдые субстраты в тех же местообитаниях. На пластик способны переселяться из окружающего природного сообщества (планктона, бентоса, фитоперифитона, нейстона и т. д.) далеко не все виды, это сообщество образующие [3; 4].

Тем не менее, освоив пластик как среду обитания, немногочисленные виды микроорганизмов получают на нём существенно большие возможности для построения колониальных поселений, колоний или же отдельных многоклеточных талломов, нежели на природных субстратах. Это объясняется отсутствием конкуренции за ресурсы пространства и связанных с его лимитом потоков иных ресурсов – по крайней мере, на ранних этапах колонизации полимерного субстрата. Сообщества, самоорганизующиеся на пластике с участием микроорганизмов, отличаются хорошим ростом и относительно быстро захватывают доступную площадь поверхности. При этом микроландшафт субстрата играет далеко не последнюю роль в процессах колонизации, т. к. разные микроорганизмы отличаются неодинаковыми предпочтениями к форме рельефа. Также важную роль в доступности синтетического полимера для колонизации играют и степень его окисленности (в процессе фотоокисления в природе), и неоднородность поверхности (как результат микроабразивных воздействий при экспозиции в дикой среде), и прозрачность самого субстрата для солнечных лучей, и гибкость материала, и, наконец, его токсичность, возникающая, в том числе, за счёт наличия красителей и пластификаторов [5].

Первичная биоплёнка служит субстратом для развития последующих стадий колонизации [6]. На всех стадиях роста микропластон может служить кормом для гидробионтов: брюхоногих моллюсков, олигохет, личинок насекомых и т. д. Изучение форм колонизации искусственных полимеров актуально с позиции их роли в экосистеме не только как самостоятельных сообществ нового типа, но и с точки зрения их участия в трофических сетях, формирующихся на пространствах водоёмов.

Долгое время низкая степень интереса к микропластону объяснялась тем, что специалисты из числа альгологов, микробиологов и протистологов рассматривали эти сообщества скорее, как «мусорный», чужеродный, априорно хаотический компонент водной экосистемы, в структуре которого трудно было бы выявить какие-то организованные процессы. Однако, с ростом степени пластикового загрязнения водоёмов, такие сообщества постепенно привлекают всё больший интерес. Водоёмы Южного Урала к настоящему времени практически не изучены в этом направлении. Настоящая работа отчасти закрывает этот пробел и посвящена анализу структуры и пространственной организации микропластона ПЭВД-плёнок бытового назначения (как широко распространённого в природе антропогенного мусора), обнаруженных летом 2023 года в реке Миасс и озере Тургояк.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследований в рамках настоящей работы послужили образцы прозрачных (бесцветных) ПЭВД хозяйственно-бытового назначения, плёнок используемых в качестве упаковочного широко материала. Все фрагменты плёнок были собраны в природных водных биотопах в июне 2023 года: 6 в оз. Тургояк, на каменистых мелководьях в районе пляжа Золотые пески, и 6 в реке Миасс, в черте г. Челябинска (Южный Урал, Российская Федерация). Озёрные локации представляли собой мелководные, не более 30 см глубиной. участки каменистого прибрежья С непериодическим воздействием сильного ветрового наката. Куски синтетических плёнок были локализованы между камнями. Речные локации, напротив, являлись прибрежными мелководными участками песчаного дна, с глубинами 30-50 см, при скорости течения не более 15-18 см/с, с разреженной водной растительностью, среди которой висели в воде куски полиэтилена.

Координаты местообитаний, из которых был взят материал, приведены в таблице 1. Плёнки экспонировались на мелководьях водоёмов уже продолжительное время, соответствующее нескольким месяцам, о чём свидетельствовало их лёгкое помутнение за счёт фотоокисления, а также сплошной испещрённости поверхностей следами микроабразивного воздействия, наличие извилистых складок и трещинок. Из каждого образца канцелярскими ножницами in situ вырезали фрагменты примерно прямоугольных очертаний со сторонами около 5 см, в двух повторностях.

Из них первую повторность фиксировали раствором этанола, помещали в ПЭТ-банке в тёмный контейнер, и после детально изучали методами световой и электронной микроскопии, а вторую просматривали с помощью световых микроскопов живьём, в ближайшие часы после отбора материала. При этом для микроскопирования от фрагментов образцов отрезали кусочки размером примерно 1x1 см, чтобы размещать их целиком под покровными стёклами на препаратах. Для каждого фрагмента были изучены по 5-8 кусочков. Удобной особенностью ПЭВД-плёнок является их прозрачность, позволяющая методами световой микроскопии изучать обе поверхности фрагмента, не переворачивая его на препарате.

Для повторностей, изучаемых живьём, проводили микрообрастания фотодокументирование на увеличениях х200 и х400, с целью запечатления характерных элементов пространственной организации микропластона. Для световой микроскопии и фотосъёмки использовали микроскопы Leica DMLS и Leica DM2500 (Leica, Germany), цифровые камеры Microscope Digital Camera M BASE Series (Levenhuk, China), Leica (встроенную камеру микроскопа Leica DM2500, Leica, Germany) и Canon PowerShot ELPH 330 HS (Canon, China). На фиксированных образцах идентифицировали видовую принадлежность микроорганизмов, используя увеличения x400 и x1000 (с помощью световых микроскопов ИОРАН) и x1000-x10000 – для СЭМ (Scanning electron microscope Camscan-S2, Accelerating voltage 20 kV, SEI mode, MicroCapture software, ZEISS, Germany). Видовую принадлежность микрофитов и протистов идентифицировали с помощью современных информационных источников, в т. ч. интерактивных [7-10].

Таблица 1. Координаты и даты отбора образцов ПЭВД-плёнок с микропластоном в р. Миасс и оз. Тургояк, Южный Урал, Российская Федерация

Table 1. Coordinates and dates of sampling of LDPE films with microplaston in the Miass River and Lake Turgovak. Southern Urals. Russia

Образец	Водоём	Координаты	Дата отбора
Sample	Water	Coordinates	Material selection date
T1	оз. Тургояк / Lake Turgoyak	55°11'00.77"C 60°04'51.89"B	21.06.2023
Т2	оз. Тургояк / Lake Turgoyak	55°10'58.92"C 60°04'52.59"B	21.06.2023
Т3	оз. Тургояк / Lake Turgoyak	55°10'56.09"C 60°04'39.46"B	21.06.2023
T4	оз. Тургояк / Lake Turgoyak	55°11'02.82"C 60°04'42.43"B	21.06.2023
Т5	оз. Тургояк / Lake Turgoyak	55°10'59.56"C 60°04'33.43"B	21.06.2023
Т6	оз. Тургояк / Lake Turgoyak	55°11'06.22"C 60°04'06.93"B	21.06.2023
M1	р. Миасс / Miass River	55°10'18.31"C 61°22'55.34"B	24.06.2023
M2	р. Миасс / Miass River	55°10'20.67"C 61°22'43.09"B	24.06.2023
M3	р. Миасс / Miass River	55°10'20.61"C 61°23'01.40"B	24.06.2023
M4	р. Миасс / Miass River	55°10'22.82"C 61°22'34.15"B	24.06.2023
M5	р. Миасс / Miass River	55°10'17.23"C 61°23'04.20"B	24.06.2023
M6	р. Миасс / Miass River	55°10'25.82"C 61°22'31.27"B	24.06.2023

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс обрастания прозрачных ПЭВД-плёнок хозяйственного значения микроорганизмами в природных водоёмах происходит не одновременно по всей их поверхности. Причин такой неоднородности в прохождении процессов колонизации много: одни участки одного и того же фрагмента плёнки находятся в складках, в условном затенении от действия текущей воды, другие более открыты для активного воздействия течения, некоторые освещены лучше других и быстрее подвергаются фотоокислению, на них по-разному воздействует нагрев солнечными лучами, они неодинаково трутся о камни на дне и т. д. В силу широкого комплекса абиотических причин, одни локусы поверхности колонизируются раньше, другие – позже. Это позволяет изучать микрообрастание пластика (микропластон) одновременно на разных стадиях колонизации, в т. ч. отслеживать последовательности построения колониальных поселений как разных экологических групп микроорганизмов, так и конкретных видов. То обстоятельство, что мы изучили фрагменты плёнок, отобранные в разных локациях одного и того же водоёма, позволило нам выявить общие последовательности колонизации ПЭНД-плёнок в оз. Тургояк и в р. Миасс (в черте г. Челябинска), а также характерные черты развития ряда видов и их комбинаций на водном пластике этого типа.

На фрагментах плёнок из р. Миасс колонизация поверхностей начиналась с развития распростёртых колониальных поселений панцирных амёб из группы микрогромиид (Granofilosea: Microgromiidae). Эти гетеротрофные одноклеточные протисты строят хитиновые домики, инкрустированные солями железа, прикрепляя их к твёрдому субстрату, и раскидывают вокруг тонкую сеть ловчих ризоподий. На изученных фрагментах они предпочитали заселять относительно ровные участки поверхности со слабой линейной абразией - протяжёнными и неглубокими царапинами. Среди них наибольшей численностью и наиболее равномерным распределением по субстрату характеризовались виды Apogromia spp. – с бурыми домиками в форме фляжек разных очертаний, с одним отверстием на вершине. Четыре вида *Apogromia* формировали на плёнках разреженные сети с разными характеристиками. Так, наиболее мелкий вид Apogromia sp. выстраивал сеть из толстостенных красно-бурых домиков каплевидной формы с ветвящимися краями, 7-8 мкм в поперечнике

(рис. 1 А) с дистанцией между ними в 20-25 домиков (примерно 160-170 мкм) - на ранних стадиях, и в 5-9 домиков (~50-55 мкм) - на более поздних этапах построения поселений. На терминальбной стадии роста вид выстраивал изогнутые цепочки по 4-5 домиков в ряд. Более крупная Apogromia flandriensis, с ассимметричными жёлтыми домиками 10-12 мкм в поперечнике, формировала ранние поселения с дистанциями в 17-20 домиков (~200-210 мкм), и поздние - с расстояниями уже в 2-8 домиков (~25-80 мкм). Третий вид, встречавшийся существенно реже – Apogromia mucicola с округлыми жёлтыми домиками 12-15 мкм изначально селился по субстрату с дистанциями в несколько сотен мкм, затем – за счёт деления отдельных особей – формировал цепочки с первичными дистанциями в 6-7 домиков (~80-90 мкм), а после заполнял участки между соседними домиками новыми особями.

Наконец, Apogromia verbrugghei с бурой каплевидной раковинкой чётких очертаний встречалась совсем редко, и дистанции между её домиками составляли более 1 мм. Следующим за ними колонизатором субстрата являлась микрогромиида Microcometes aculeata, образующая уплощённые бурые домики с несколькими отверстиями и покрывающая пластик более распростёртой сетью ризоподий. Домики этого вида имели размеры 12-15 мкм и расстояния между ними составляли 20-30 особей (~250-400 мкм). Уплотнения колониальных поселений этого вида не происходило. В свою очередь, Ditrema mukrous, обладающая довольно крупными жёлто-бурыми домиками сложных очертаний (21-28 мкм), выстраивала довольно компактные поселения: при начальных дистанциях в 7-8 особей (~180-190 мкм), с постепенным заполнением пространства между ними новыми домиками. Последний вид микрогромиид – Belaria bicorpor с крупными двухкамерными домиками – встречалась единично. Таким образом, несколько представителей одной экологической группы выстраивали здесь на ПЭВД-плёнках систему перекрывающихся разреженных колониальных поселений, покрывая субстрат с разной степенью агрегированности.

Следом за панцирными амёбами поверхности колонизировали прикреплённые диатомеи из групп ахнантоидов и кокконеоидов (Bacillariophyta: Achnanthaceae, Cocconeidaceae). Отметим, что для представителей родов *Planothidium* и *Cocconeis*, активно размножавшихся на плёнках, достаточно редко

отмечается передвижение клеток на большие расстояния. Наши наблюдения на изученном спектре образцов показали, что в составе их популяций есть примерно 2–3 клетки на тысячу, функция которых состоит в том, чтобы переползать из сформированного, распростёртого и достаточно многочисленного колониального поселения на новые, незаселённые видом участки, отстоящие на расстояния порядка нескольких миллиметров. Далее клетка прикрепляется к субстрату, делится и дочерняя особь смещается от неё на сравнительно небольшую дистанцию, специфичную для вида. Затем, посредством несколько последующих делений с отползанием клеток на примерно равные расстояния в разных направлениях, формируется первичная сеть колониального поселения. Дальнейшее деление клеток формирует разреженные цепочки первичной колонизации, параметры которых – плотность расположения клеток, их ориентация – также специфичны для вида. По мере увеличения числа особей в цепочках вырисовывается орнамент колониального поселения, в развитом состоянии состоящий из примерно сходных в очертаниях групп клеток и извилистых просветов между ними.

На плёнках в р. Миасс были отмечены три вида Cocconeis. Среди них Cocconeis placentula var. klinoraphis встречался наиболее часто и строил слабо разветвлённые цепочки первичной колонизации. В их составе клетки длиной 19-22 мкм дистанцировались друг от друга на 3-4 особи (~60-80 мкм), а затем заполняли эти расстояния дочерними клетками, располагавшимися под разными углами (рис. 1 В). В свою очередь, Cocconeis lineata расселялся по плёнкам достаточно обширно и разреженно, образуя лишь сильно разрозненные группы из двух клеток длиной 25-27 мкм, разнесённых на дистанцию в 2-3 особи (~52-64 мкм). Более мелкий Cocconeis pseudothumensis (12–15 мкм) встречался либо поодиночке, либо компактными группами до 3-4 клеток, на 2-3 друг от друга (~30-40 мкм), под разными углами. На поздних стадиях роста был способен выстраивать компактные пятна до 15-18 клеток.



Рисунок 1. А — разреженное колониальное поселение микрогромиид *Apogromia* sp. (*Ap*) на относительно ровном участке поверхности ПЭВД-плёнки. В — цепочка первичной колонизации полимерного субстрата клетками *Cocconeis placentula* var. *klinoraphis* (*Coc*)

Figure 1. A – sparse colonial settlement of microgromiids *Apogromia* sp. (*Ap*) on a relatively flat area of the surface of LDPE film. B – chain of primary colonisation of the polymer substrate by cells of *Cocconeis placentula* var. *klinoraphis* (*Coc*)

Существенно более многочисленные, обширные и орнаментированные поселения формировали виды Planothidium. На открытых, относительно слабо исчерченных абразией пространствах поверхностей плёнок поселения (плоскостные пятна роста) разных видов этого рода различались очень отчётливо – уже по диапазонам размеров и очертаниям клеток. В составе одного поселения клетки различались по длине максимум на 1,5–2,5 мкм. Поэтому при врастании одного пятна в другое можно было отследить расположение особей разных видов. Для всех видов был характерен первичный захват территории сетью из клеток. Например, Planothidium frequentissimum был представлен двумя устойчивыми морфами клеток: с широко округлёнными концами (12-13 мкм) и с более приостренными и слегка головчато оттянутыми (15-16 мкм). Первая морфа образовывала разреженные зигзаговидные цепочки, за счёт деления клеток,

переходившие в сеть в виде треугольных ячеек со сторонами примерно в 5-5,5 клеток (~60-70 мкм). Затем, по мере деления клеток в «узлах» этой сети с их расползанием в разных направлениях на меньшие расстояния, вырисовывались относительно плотные цепочки первичной колонизации. Они располагались примерно округлыми завитками, с внутренним зазором шириной в 3-3,5 длин клетки (~36-44 мкм). На следующем этапе клетки начинали делиться с отползанием вбок, и формировали гроздьевидные структуры. Между ними оставались просветы шириной в 3-4 длины особей (рис. 2). Вторая морфа также начинала колонизацию с извилистых цепочек, затем выстраивала разреженную сеть из треугольных ячей, с промежутками в 4,5-5 особей между «узлами», а заканчивалось построение поселения формированием рыхлых вторичных цепочек в форме завитков, с просветами на 2-3 длины клетки (~30-45 мкм).



Рисунок 2. Средние (A, B) и поздняя (C) стадии формирования колониального поселения 1 морфы *Planothidium frequentissimum* (Pf). В развитом поселении присутствуют клетки *Humidophila* cf. *gallica* (*Hg*) **Figure 2.** Middle (A, B) and late (C) stages of formation of colonial settlement 1 morph *Planothidium frequentissimum (Pf)*. The developed population contains cells of *Humidophila* cf. *gallica* (*Hg*)

Похожие последовательности развития плоскостных структур продемонстрировали и два других вида этого рода. Для *Planothidium lanceolatum* было характерно дискретное развитие пятен из клеток с длинами 14,7–15,5 мкм и 17,6–18,5 мкм. Первая морфа выстраивала ветвящиеся первичные цепочки с промежутками на 2–3 особи (~30–45 мкм), вторая – на 3–4 особи (~54–75 мкм). На второй стадии пространства между «узлами» заполнялись клетками под разными углами, на третьей делящиеся клетки формировали вытянутые гроздьевидные контуры с просветами между ними в 1–1,5 длины клетки (рис. 3).

Наиболее мелкий, обладающий широкоэллиптическими клетками Planothidium joursacense (7–7,5 мкм) выстраивал разреженные первичные цепочки сразу в виде округлых или волнистых завитков, а затем заращивал клетками начальные промежутки (3,5–4 особи, или ~25–29 мкм) между «узлами», формируя широкие дорожки из плотных гроздьевидных структур (рис. 4).

Прикреплённые диатомеи Lemnicola hungarica (21-23 мкм) формировали рассеянные сети (рис. 5) на ровных, не подверженных абразии участках, Gomphonema parvulum (30-35 мкм) - напротив, небольшие компактные пучки в просветах линейных царапин, а Humidophila cf. gallica (14–15 мкм) встречались либо рассеянными клетками среди пятен Planothidium spp., либо образовывали небольшие лентовидные колонии в просветах царапин. Также на поверхности плёнок изредка встречались отдельные клетки различных видов Nitzschia, утратившие подвижность, и небольшие компактные колониальные поселения Amphora inariensis и Encyonema minutum, не отличавшиеся специфическими чертами мозаики.

Третьей стадией колонизации было появление на плёнках ветвящихся корковых талломов зелёных водорослей, таких как Protoderma frequens, Entocladia viridis (рис. 6 А) и, изредка, Phycopeltis epiphyton, также предпочитавших заселять ровные участки поверхности. Следом за ними появлялись небольшие корковые слоевища жёлто-зелёной водоросли Chlorellidiopsis separabilis, а также небольшие группы коккоидных зелёных Ignatius tetrasporus, Pseudocharacium acuminatum. Интересно отметить, что планктонные Ankistrodesmus sp. и Pseudopediastrum boryanum вели на плёнках прикреплённый образ жизни. Цианобактериальный компонент обрастания был представлен только двумя видами: тонкотрихомной Pseudanabaena galeata и Chamaesiphon sp.

Скопление мелкодисперсного детрита происходило преимущественно в местах пересечения относительно широких абразивных борозд (царапин). Здесь же активно развивались распростёртые колонии гетеротрофных бактерий, а также небольшие колонии коккоидных железобактерий, подвижные голые амёбы (Naked Lobose Amoebae: *Korotnevella stella*) и прикреплённые солнечники (Heliozoa) – последние две группы существ элиминировали избыток подвижных бактерий.

Картина формирования микрообрастания на ПЭВД-плёнках на каменистых мелководьях оз. Тургояк выглядела совершенно иначе. Отметим, что сами поверхности плёнок здесь были густо покрыты сетью мельчайших микроскладок, возникающих при длительной экспозиции ПЭВД на открытом солнечном свете под влиянием фотоокисления, перепадов температуры и частых перегибов плёнки за счёт гидродинамического воздействия. Также плёнки изобиловали протяжёнными извилистыми микротрещинами шириной до нескольких десятков микрон, тонкими прямыми складками, в которых особенно сильно концентрировалось разнообразие микроскопических форм жизни, вмятинами механического характера, где скапливался детрит, и небольшими застывшими волнообразными изгибами. По вогнутым сторонам складок обильно развивались компактные и при этом весьма многочисленные колониальные поселения диатомей Encyonema minutum, а также обильно разрастались куртинки цианобактерий Calothrix cf. stagnalis, Pseudanabaena rosea и Leptolyngbya sp. Здесь же часто встречались крупные прикреплённые клетки диатомеи Epithemia turgida.



Рисунок 3. Средние (А, В) и поздняя (С) стадии развития колониального поселения 1 морфы Planothidium lanceolatum (Pl) Figure 3. Middle (A, B) and late (C) stages of development of colonial settlement 1 morph Planothidium lanceolatum (Pl)

А В С

Рисунок 4. Средние (А, В) и поздняя (С) стадии формирования колониального поселения *Planothidium joursacense* **Figure 4.** Middle (А, В) and late (С) stages of the formation of a colonial settlement of *Planothidium joursacense*



Рисунок 5. Разреженная сеть колониального поселения *Lemnicola hungarica* (Lh) Figure 5. Sparse network of a colonial settlement of *Lemnicola hungarica* (Lh)

По выпуклым сторонам тех же складок, обращённым на противоположную поверхность плёнки, как по протяжённым острым всхолмьям обильно развивались корковые зелёные нитчатки Protoderma viride (рис. 6 В), а также разноплотные колониальные поселения Cocconeis placentula var. klinoraphis. Этот же вид колонизировал бровки пологих складок. В свою очередь, P. viride развивалась также по краям извилистых царапин и крупных трещин, в то время как их внутреннее пространство обильно зарастало C. cf. stagnalis. Во вмятинах, где скапливался детрит, часто развивалась пальмеллевидная форма Chlamydomonas sp., а также курчавые куртинки Leptolyngbya sp., содержавшие многочисленные ценобии Scenedesmus spp., обильные колониальные поселения Chamaesiphon sp. и скопления клеток Chlorella sp. По склонам пологих волнообразных изгибов часто встречались небольшие распростёртые талломы Phycopeltis epiphyton (рис. 6 C), P. irregularis (рис. 6 D), Coleochaete scutata, реже – Coleochaete irregularis, P. freguens и C. separabilis.

Эти виды корковых нитчаток формировали основную часть микрообрастания, занимая наибольшую площадь относительно неоднородного микроландшафта. Также изредка встречалась стелящаяся бурая нитчатка *Heribaudiella fluviatilis*, впервые отмеченная здесь для водоёмов Западной Сибири.

Однако, корковые нитчатки являлись не первичным компонентом при формировании микропластона ПЭВД-плёнок в оз. Тургояк. Их слоевища часто разрастались вокруг отдельных клеток и небольших групп прикреплённых диатомей, таких как Epithemia porcellus, E. proboscidea и E. perlongicornis. Эти три вида выстраивали небольшие цепочки первичной колонизации на складчатых участках микрорельефа (рис. 7 А) и часто встречались одиночно - на относительно ровных. Особой массовости они при этом не создавали. При развитии небольших поселений Epithemia spp. во вмятинах, вокруг них в массе развивались цианобактерии *P. rosea*, а также пальмеллевидные образования различных видов Cosmarium. На разных по микрорельефу участках вблизи

краёв фрагментов, где интенсивнее сказывались гидродинамические воздействия, в массе развивались небольшие компактные колонии очень мелких хроококковых цианобактерий *Cyanogranis* sp., а также распростёртые колонии хризомонады *Chrysosaccus* sp. (рис. 7 В). Панцирные амёбы из числа микрогромиид встречались на плёнках в этих местообитаниях весьма редко. Отдельные особи, принадлежавшие трём видам (*Apogromia flandriensis, Ditrema mukrous* и *Belaria bicorpor*), обнаруживались на практически чистых участках полимера, не заселённых более никем, а также – в виде полуразрушенных домиков – среди цепочек диатомей. Это может свидетельствовать о самой ранней колонизации субстрата именно этими организмами, не получившими здесь, однако, успешного развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши наблюдения показали, что колонизация одних и тех же ПЭВД-плёнок хозяйственного назначения, широко распространённых в природе в качестве пластикового мусора, происходит в начале лета неодинаковыми путями при разной гидрологической обстановке в водоёмах Южного Урала. При этом микроландшафт поверхности плёнок также различается. Тем не менее, часть структурообразующих видов остаются общими. Нам удалось отследить формы и последовательности колонизации этих полимерных субстратов массовыми видами, в т. ч. характерные черты построения колониальных поселений, образуемых прикреплёнными диатомеями. Полученные данные говорят о том, что, как и при росте колоний у других видов диатомей, колониальные поселения являются формой последовательной самоорганизации структур надорганизменного уровня. По сути, любые диатомеи, ведущие прикреплённый образ жизни, выстраивают относительно регулярные структуры с определёнными адаптивными свойствами, обладающие признаками пространственной иерархичности. На природных субстратах виды Cocconeis, Planothidium и Lemnicola распространены весьма широко, однако подвержены прессу конкуренции за пространство и потоки ресурсов.



Рисунок 6. Зелёные нитчатые микроводоросли, образующие корковые талломы на ПЭВД-плёнках: A – Entocladia viridis и Protoderma freguens, B – Protoderma viride, C – Phycopeltis epiphyton, D – Phycopeltis irregularis **Figure 6.** Green filamentous microalgae forming cortical thalli on LDPE films: A – Entocladia viridis and Protoderma freguens, B – Protoderma viride, C – Phycopeltis epiphyton, D – Phycopeltis irregularis



Рисунок 7. А – цепочки первичной колонизации, образованные на ПЭВД-плёнке разными видами прикреплённых диатомей из рода *Epithemia* (Ep). В – массовые виды, развивавшиеся в краевых зонах плёнок: компактные колонии цианобактерий *Cyanogranis* sp. (Cy) и корковые хризомонады *Chrysosaccus* sp. (Chr) Figure 7. A – chains of primary colonisation formed on LDPE film by different species of attached diatoms of the genus *Epithemia* (Ep). B – widespread species that developed in the marginal zones of films: compact colonies of cyanobacteria *Cyanogranis* sp. (Cy) and cortical chrysomonad *Chrysosaccus* sp. (Chr)

На пластике, ввиду существенно более низкой конкуренции за ресурсы и наличия однородных участков микроландшафта, такие прикреплённые диатомеи

демонстрируют, какие именно пространственные структуры каждый из видов способен выстраивать на самом деле. Последовательность колонизации пластика изученного типа сводится к следующим стадиям: первыми поселяются микрогромииды, затем диатомеи, после корковые нитчатки и цианобактерии, затем все остальные группы микроогранизмов. При этом в более гидрологически агрессивной среде озёрных каменистых мелководий стадия колонизации мимикрогромиидами практически не выражена. Здесь преобладают более устойчивые к абразии и волнению формы диатомей (эпитемиоиды), не строящие развитых и хорошо структурированных колониальных поселений, но при этом сохраняются те же массовые кокконеоиды, что и в медленно текущих водах.

В обоих случаях сообщества были в достаточной степени разнообразны, отдельные виды имели привязку в развитии к определённым формам микроландшафта. Все эти признаки определяют ранние стадии роста микропластона ПЭВД-плёнок в пресных водах Южного Урала как развитые, пространственно структурированные сообщества — и как основы для выстраивания более иерархически дифференцированных структур на протяжении летнего сезона. Эти сведения могут быть использованы при культивировании микроводорослей в природных водоёмах в качестве корма для мальков рыб и водных беспозвоночных.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Настоящая научная работа была выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ 23-17-00167. Электронно-микроскопические исследования были проведены в общефакультетской лаборатории электронной микроскопии Биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

ACKNOWLEGMENT

This scientific work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation project 23-17-00167. SEM studies were carried out at the Electron Microscopy Laboratory, Faculty of Biology Moscow State University.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zettler E.R., Mincer T., Proskurowski G., Amaral-Zettler L.A. The «Plastisphere»: a new and expanding habitat for marine protists. Journal Phycology. 2011. V. 47. P. 7137–7146. https://doi.org/10.1021/es401288x

2. Zettler E.R., Mincer T.J., Amaral-Zettler L.A. Life in the «Plasti-sphere»: microbial communities on plastic marine debris. Environment Scientific Technoljgy. 2013. V. 47. P. 7137–7146. https://doi.org/10.1021/es401288x

3. Sapozhnikov P. et al. Plastic in the Aquatic Environment: Interactions with Microorganisms. In: Stock F., Reifferscheid G., Brennholt N., Kostianaia E. (eds) // Plastics in the Aquatic Environment - Part I. 2021 V. 111. P. 197–254. https://doi.org/10.1007/698_2021_747

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Ольга Ю. Калинина провела сбор и фиксацию материала, нарезку образцов на фрагменты, изготовление препаратов живого и фиксированного материала и обширное фотодокументирование сообществ с помощью световой и электронной микроскопии. Филипп В. Сапожников провёл детальное изучение количественной структуры и пространственной организации сообществ на живых и фиксированных фрагментах ПЭВД-плёнок по цифровым фотоматериалам, описал процессы Arias-Andres M., Kettner M.T., Miki T., Grossart H.P. Microplastics: new substrates for heterotrophic activity contribute to altering organic matter cycles in aquatic ecosystems // Science of The Total Environment. 2018. V. 635. P. 1152–1159. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.199
 Amaral-Zettler L.A., Zettler E.R., Mincer T.J. Ecology of the plastisphere // Nature Reviews Microbioogy. 2020. N 18. P. 139– 151. DOI: 10.1038/s41579-019-0308-0
 Zhai X., Zhang X.H., Yu M. Microbial colonization and degradation of marine microplastics in the plastisphere: A review // Front Microbiology. 2023. V. 14. DOI:

10.3389/fmicb.2023.1127308

 Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway.
 Witkowski A., Lange-Bertalot H., Metzeltin D. Diatom flora of Marine Coasts I. Iconographia Diatomologica 7, 2000. 925 p.
 Spaulding et al. Diatoms.org: supporting taxonomists, connecting communities // Diatom Research. V. 36. Iss. 4. P. 291–304. DOI: 10.1080/0269249X.2021.2006790
 Wehr J.D., Sheath R.G. Freshwater algae of North America: ecology and classification. Academic Press, 2003. 917 p.

REFERENCES

1. Zettler E.R., Mincer T., Proskurowski G., Amaral-Zettler L.A. The "Plastisphere": a new and expanding habitat for marine protists. *Journal Phycology*, 2011, vol. 47, pp. 7137–7146. https://doi.org/10.1021/es401288x

2. Zettler E.R., Mincer T.J., Amaral-Zettler L.A. Life in the "Plasti-sphere": microbial communities on plastic marine debris. *Environment Scientific Technoligy*, 2013, vol. 47, pp. 7137–7146. https://doi.org/10.1021/es401288x

3. Sapozhnikov P. et al. Plastic in the Aquatic Environment: Interactions with Microorganisms. In: Stock F., Reifferscheid G., Brennholt N., Kostianaia E. (eds). *Plastics in the Aquatic Environment - Part I*, 2021, vol. 111, pp. 197–254. https://doi.org/10.1007/698_2021_747

 Arias-Andres M., Kettner M.T., Miki T., Grossart H.P. Microplastics: new substrates for heterotrophic activity contribute to altering organic matter cycles in aquatic ecosystems. *Science of The Total Environment*, 2018, no. 635, pp. 1152–1159. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.199
 Amaral-Zettler L.A., Zettler E.R., Mincer T.J. Ecology of the plastisphere. *Nature Reviews Microbioogy*, 2020, no. 18, pp. 139–151. DOI: 10.1038/s41579-019-0308-0

6. Zhai X., Zhang X.H., Yu M. Microbial colonization and degradation of marine microplastics in the plastisphere: A review. *Front Microbiology*, 2023, vol. 14. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1127308

7. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway.

Witkowski A., Lange-Bertalot H., Metzeltin D. *Diatom flora of Marine Coasts I* Iconographia Diatomologica 7, 2000, 925 p.
 Spaulding et al. Diatoms.org: supporting taxonomists, connecting communities. *Diatom Research*, vol. 36, iss. 4, pp. 291–304. DOI: 10.1080/0269249X.2021.2006790Wehr J.D., Sheath R.G. Freshwater algae of North America: ecology and classification. Academic Press Publ., 2003, 917 p.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Olga Yu. Kalinina collected and fixed material, cut samples into fragments, made preparations of living and fixed material and extensively photographed communities using light and electron microscopy. Philipp V. Sapozhnikov conducted a detailed study of the quantitative structure and spatial organization of communities on living and fixed fragments of LDPE films using digital photographic materials, described the processes of colonization and the features of building colonial settlements of microphytes and wrote the article. колонизации и особенности выстраивания колониальных поселений микрофитов, написал рукопись. Сергей В. Востоков занимался научным дизайнингом и корректурой рукописи до подачи в редакцию журнала. Все авторы сообща оформили концепцию статьи и в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Sergey V. Vostokov was involved in the scientific design and proofreading of the manuscript before submitting it to the Editor. All authors jointly formulated the concept of the article and are equally responsible for plagiarism, selfplagiarism or other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Филипп В. Сапожников / Philipp V. Sapozhnikov <u>https://orcid.org/0000-0002-3239-6543</u> Ольга Ю. Калинина / Olga Yu. Kalinina <u>https://orcid.org/0000-0001-9446-9149</u> Сергей В. Востоков / Sergey V. Vostokov <u>https://orcid.org/0000-0002-0754-9325</u>