



УДК 574.632

ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОРΟΣЛЕВЫХ ОБРАСТАНИЙ НА ПЛАСТИКОВЫХ СУБСТРАТАХ В КАРСТОВЫХ ВОДОЕМАХ ПУСТЫНСКОГО ЗАКАЗНИКА НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ (РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИРОДНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА)

Воденеева Екатерина Леонидовна, доцент, к.б.н., заведующий кафедрой ботаники и зоологии института биологии и биомедицины ФГАОУ ВО ННГУ

Пичугина Юлия Михайловна, студент кафедры ботаники и зоологии института биологии и биомедицины ФГАОУ ВО ННГУ; лаборант-исследователь ФИЦ ИПФРАН

Журова Дарья Алексеевна, лаборант кафедры ботаники и зоологии института биологии и биомедицины ФГАОУ ВО ННГУ; младший специалист лаборатории водных биоресурсов Нижегородского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («НижегородНИРО»); стажер лаборант-исследователь ФИЦ ИПФРАН

Шарагина Екатерина Михайловна, ассистент кафедры ботаники и зоологии института биологии и биомедицины ФГАОУ ВО ННГУ

Середнева Яна Вадимовна, ассистент кафедры ботаники и зоологии института биологии и биомедицины ФГАОУ ВО ННГУ

Кулизин Павел Владимирович, ассистент кафедры ботаники и зоологии института биологии и биомедицины ФГАОУ ВО ННГУ

ФГАОУ ВО Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23
Нижегородский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
рыбного хозяйства и океанографии»
603116, г. Нижний Новгород, Московское шоссе, д. 31
ФИЦ ИПФРАН
603155, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда №23-17-00167

Аннотация. Приведены первые результаты природного эксперимента по изучению водорослевых обрастаний разных пластиковых субстратов (PET, LDPE, PP, PS) в пресноводных карстовых водоемах, расположенных в Пустынском заказнике (Нижегородская область). Проанализирован видовой состав фитопланктона и фитоперифитона, дана оценка его сходства. Определены показатели развития водорослей и комплекс доминирующих видов.

Ключевые слова: пластик, загрязнение, водоросли, сообщества обрастателей, фитоперифитон, карстовые водоемы, Пустынский заказник.

Введение

Резкий рост производства и потребления пластика за последние 50 лет стал причиной глобальной экологической проблемы – загрязнения Мирового океана. По данным статистики, мировой объем произведенного пластика составил 368 млн тонн [1], из которого около 8 млн тонн ежегодно попадает в океан, представляя угрозу как природным экосистемам, так и здоровью человека [2]. Попадающий в водоем макро- и микропластик представляет новый искусственный субстрат, на котором развиваются сообщества организмов-обрастателей, образуя здесь биопленку. Среда, в которой субстратом является пластик, была названа особым термином – пластисферой [3]. Водоросли, наряду с бактериями и грибами, являются важнейшими компонентами пластисферы, одними из первых обрастают пластик, и в определенной мере способствуют его деградации. Большинство публикаций, посвященных изучению биопленок пластиковых субстратов, касаются морских экосистем, пресноводные водоемы в этом плане изучены слабее, что в значительной мере затрудняет формирование целостного научного представления о структуре и функционировании пресноводных гидроэкосистем [4].

Цель работы – оценить видовой состав и этапы формирования водорослевых сообществ на разных типах полимерных материалов в условиях эксперимента в карстовых водоемах, испытывающих сильную антропогенную нагрузку.

Материалы и методы

Эксперимент по изучению состава и показателей развития водорослей на разных пластиковых субстратах был проведен в двух карстовых водоемах, расположенных на территории Пустынского заказника (Арзамасский район, Нижегородская область). Озеро Великое – верхнее озеро в системе озер заказника, имеет общую площадь 91,25 га, длину до 1600 м, ширину до 780 м. Средняя глубина озера 3,5 м, но в центре имеются глубины до 11 м. Озеро имеет эвтрофный статус и характеризуется летней гомотермией [5]. На востоке в озеро впадает река Серёжа, на северном берегу расположена биостанция ННГУ. Протока – представляет собой канал, соединяющий оз. Великое и оз. Свято, расположенный с правой стороны р. Серези. Канал имеет вытянутую форму, площадь составляет 25,31 га, длина — 1700 м, средняя ширина — 60 м, средняя глубина — 1,8 м, максимальная глубина — 3,5 м. В летний период в водоеме имеет место гомотермия. В последние годы оба водоема испытывают сильную антропогенную нагрузку.

Пластмассовые установки в данном эксперименте были изготовлены из обычных бытовых пластиков, часто встречающихся в пресных водоемах: бутылок из-под минеральной воды (PET), пленки (LDPE), ланч-боксов (PP) и напольного утеплителя (PS). Каждая установка содержала один из четырех типов пластика, которые фиксировали на двух глубинах фотической зоны водоема: поверхность и нижняя граница прозрачности (в день установки прозрачность составляла 1 м). На пластиковых материалах проводились надрезы для дальнейшего сбора материала. Эксперимент был установлен 4 июля 2023 на двух прибрежных станциях (ст. 1 – Протока, ст. 2 – оз. Великое). Пробы образцов собирали через 3, 10, 16, 21 дней со дня установки. Всего было отобрано 72 пробы. Для оценки фонового состояния вместе с отбором проб фитоперифитона пластика в поверхностном слое водоема также производился сбор проб фитопланктона объемом 0,5 литра. В лабораторных условиях проводили подготовку проб к микроскопированию.

Отбор и обработку проб фитопланктона и фитоперифитона проводили согласно методическим рекомендациям [6,7]. Предварительно структуру сообществ обрастателей оценивали на нефиксированном влажном препарате непосредственно на субстрате под микроскопом. Идентификация водорослей проводилась с помощью оптического

микроскопа MEIJI Techno (Saitama, Japan) при увеличениях 200, 400 и 1000 (масляная иммерсия) с использованием отечественных и зарубежных определителей, перечень которых был указан ранее [8].

Для оценки количественных показателей обрастателей налет счищали кистью и смывали в определенный объем (5мл) отфильтрованной воды из исследуемого водоема. Численность и биомассу фитоперифитона рассчитывали в соответствии с работами [7,9,10]. К доминирующим отнесены виды с численностью или биомассой $\geq 10\%$ общей величины [11]. Сходство видового состава альгоценозов оценивали с использованием качественной меры Серенсена [12].

Результаты и их обсуждение

Таксономическое разнообразие водорослей, составляющих фитопланктонные сообщества исследуемых карстовых водоемов, было сформировано 49 таксонами рангом ниже рода. Наиболее богато альгофлора планктона была представлена в озере Великом – 45 видов водорослей из 6 отделов, тогда как в Протоке выявлено только 16 таксонов, что можно объяснить более низким трофическим статусом последнего. По видовому богатству в обоих водоемах выделялись зеленые (31-37% общего состава) и цианобактерии (25-31%), в озере Великом также диатомеи (18%). Общий список видов водорослей-обрастателей был заметно богаче и включал 147 видовых таксонов, среди которых на всех видах пластика преобладали диатомовые водоросли (34-59%), вторую позицию устойчиво занимали цианобактерии (15-35%), третью – зеленые или харовые водоросли (7-25%). Известно, что диатомеи являются одними из первых колонизаторов пластиковых субстратов, часто отмечаются как преобладающая по разнообразию группа (до 60% от общего состава видов-обрастателей) [13, 14, 15]. Максимальное число видов водорослей было отмечено на полиэтилентерефталате (PET) как в озере Великом, так и в Протоке, минимальное – на полистироле (PS). По аналогии с видовым богатством фитопланктона в озере число видов-обрастателей было в 1,5-2 раза выше, чем в Протоке.

В большинстве работ по водорослевым сообществам пластиковых субстратов, отмечалась специфичность их состава в сравнении с таковым планктонных сообществ данного водоема [3, 16, 17, 18, 19]. Подобные закономерности были отмечены и в нашем эксперименте. Оценка сходства состава водорослевых обрастаний разных типов пластика в исследуемых водоемах показала, что, несмотря на близость расположенных акваторий и их гидрологическую связь, состав обрастателей одинаковых пластиковых субстратов заметно различался и определялся, по всей видимости, локальной совокупностью факторов. Коэффициент сходства состава обрастателей с планктонной альгофлорой в оз. Великом составлял 7-34% (благодаря более высоким концентрациям клеток водорослей в этом водоеме здесь активнее шли процессы осадконакопления на погруженных пластиковых субстратах), тогда как в Протоке – 0-15%. Это может свидетельствовать о таксономическом своеобразии формирующихся на пластике сообществ.

В период исследования в фитопланктоне озера Великое численно преобладали цианобактерии (средняя общая численность – 30 млн кл./л, доминанты – *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault (до 90% общих значений), *Dolichospermum* spp. – до 10-15%), тогда как в Протоке – фитофлагеллята из рафидофитовых (численность 1,11 млн кл./л; доминант – *Gonyostomum semen* (Ehrenberg) Diesing (до 35%)). Показатели развития фитопланктона характеризовали оз. Великое как эвтрофный водоем, Протоку – как мезотрофный. Колонизация пластиковых субстратов в озере Великом началась с третьего дня экспозиции. В Протоке этот процесс шел значительно медленнее: на третьи сутки остались незаселенными PP и PS (оба горизонта), LDPE(поверхность). В обоих водоемах (активнее в оз. Великом) с увеличением времени экспозиции численность водорослей возрастала, причем в поверхностных горизонтах показатели развития могли превышать таковые глубинных более чем в 100 раз. Среди типов пластика наиболее высокие показатели концентрации клеток водорослей в оз. Великое отмечались для PP

(5613,61 тыс. кл /10см²) и PET (3440,73 тыс. кл /10см²), в Протоке – для LDPE (429,23 тыс. кл /10см²) (Таблица 1).

Таблица 1

Диапазон значений численности фитоперифитона (тыс.кл./10см²) пластиковых субстратов и фитопланктона (млн кл./л) в исследуемых водоемах

Тип пластика	Водоем			
	озеро Великое		Протока	
	поверхность	глубина	поверхность	глубина
PET	0,40 – 3440,73	0,58 – 24,18	0,01 – 463,64	0,03 – 29,45
LDPE	0,98 – 429,23	0,24 – 86,78	6,11 – 78,89	0,65 – 55,14
PP	0,80 – 5613,61	0,49 – 25,86	5,99 – 665,89	0,34 – 13,25
PS	0,69 – 66,85	0,76 – 19,03	51,89 – 181,67	3,59
Фитопланктон	2,80 – 82,05		0,36 – 2,28	

В обоих водоемах в первой половине эксперимента доминантами по численности на всех типах пластика чаще отмечались цианобактерии (до 98-99%) и диатомеи (до 47-100%), причем состав доминант различался. Доля зеленых (нитчатки из рода *Oedogonium* sp.) была максимальна на PS в Протоке (84%). Во второй половине эксперимента (20-25 июля) наблюдался рост численности харовых (виды пластинчатой водоросли рода *Coleochaetae*) для всех типов пластика (кроме PS) составлял до 84% в Протоке и 91% в Великом (особенно активно колонизировались PP и PET). Максимальная доля этих обрастателей отмечалась в поверхностных горизонтах. В составе доминирующих видов отмечалось более высокая доля типичных обрастателей (бентосные формы, эпибиоты) на субстратах в Протоке, тогда как в озере Великое в составе доминант высока доля планктонных и гетеротопных видов.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований обрастаний полимерных синтетических субстратов в двух водоемах Пустынского заказника уже через 3 дня экспозиции отмечены первые этапы колонизации пластика водорослями. Невысокая степень сходства состава видов-обрастателей с составом фитопланктона на протяжении всего эксперимента может свидетельствовать о таксономическом своеобразии формирующихся на пластике сообществ. С увеличением времени экспозиции происходило возрастание численности водорослей, более заметно в поверхностных горизонтах. Наиболее активно развитие фитоперифитона проходило в эвтрофном озере Великом на таких субстратах как PET и PP.

Список литературы:

1. Plastics – the Facts 2020. An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data // PlasticsEurope. – 2020. URL: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>.
2. Cera A., Cesarini G., Scalici M. Microplastics in freshwater: what is the news from the world? // Diversity. – 2020. 12:276. URL: https://doi.org/10.3390/d1207_0276.
3. Zettler E.R., Mincer T.J., and Amaral-Zettler L.A. Life in the “Plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris // Environ. Sci. Technol. – 2013 – V. 47. P. 7137–7146.
4. Протасов А.А. Пресноводный перифитон. – Киев: Наук. думка. – 1994. – 307 с.
5. Лаврова Т.В. Пространственная структура зоопланктона на акватории озерной системы: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Нижний Новгород: ННГУ. – 2000. – 16 с.
6. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. – М.: Наука, 1975. – 240 с.
7. Комулайнен С. Ф. Методические рекомендации по изучению фитоперифитона в малых реках. – Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. – 2003 – 40 с.
8. Воденеева Е.Л., Кулизин П.В. Водоросли Мордовского заповедника (аннотированный список видов). – М.: Изд-во: Объединенная дирекция МГПЗ им. П.Г.Смидовича и нац. парка «Смольный». – 2019. – 62 с. [Флора и фауна заповедников. Вып. 134].

9. Метелёва Н.Ю. Структура и продуктивность фитоперифитона водоёмов бассейна Верхней Волги: дисс. ... канд. биол. наук. – Борок. – 2013. – 186 с.
10. Okhapkin A.G., Khedairia T., Yakimov V.N. Composition and structure of benthic algal communities of a large eutrophic river (using the example of the Oka River, Russia): II. Abundance parameters and species diversity of communities // *Inland Water Biology*. – 2023. – V. 16. – № 1. – P. 27-34.
11. Воденеева Е.Л., Охапкин А.Г., Генкал С.И., Кулизин П.В., Шарагина Е.М., Скамейкина К.О. Состав, структура и распределение фитопланктона высокоминерализованного карстового озера // *Биология внутренних вод*. – 2020. – № 6. – С. 573-582. DOI: 10.31857/S0320965220050150.
12. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. – Тольятти: Ин-т экологии Волжского бассейна РАН. – 2003. – 463 с.
13. Reisser J., Shaw J., Hallegraeff G., Proietti M., Barnes D. K. A., Thums M., et al. Millimeter-sized marine plastics: a new pelagic habitat for microorganisms and invertebrates // *PLoS ONE*. – 2014. – V. 9 (6). – e100289.
14. Davidov K., Iankevich-Kounio E., Yakovenko I., Koucherov Y., Rubin-Blum M., Oren M. Identification of plastic-associated species in the Mediterranean Sea using DNA metabarcoding with Nanopore // *MinION. Sci Rep*. – 2020. V. 10. – P. 17533.
15. Taurozzi, D., Cesarini, G., Scalici, M. Epipelagic microhabitats for epibenthic organisms: a new inland water frontier for diatoms. // *Environ. Sci. Pollut. Res* 30. – 2023 – P. 17984–17993. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23335-8>.
16. Сапожников, Ф.В., Снигирева, А.А., Калинина, О.Ю. Архитектура фитоперифитона полиэтиленовой пленки с поверхности Черного моря // *Материалы IV Всеросс. науч. конф. с международ. участием “Водоросли: Проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге”*. Санкт-Петербург – 2018. С. 378-383.
17. Amaral-Zettler L. A., Zettler E. R., Slikas B., Boyd G. D., Melvin D. W., Morrall C.E. et al. The biogeography of the plastisphere: implications for policy//*Front. Ecol. Environ*. – 2015. V. 13. – P. 541–546. doi: 10.1890/150017.
18. McCormick A., Hoellein T.J., Mason S.A., Schlupe J. and Kelly J.J. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river // *Environ. Sci. Technol*. – 2014. V. 48. – P. 11863–11871.
19. Oberbeckmann S., Kreikemeyer B., Labrenz M. Environmental factors support the formation of specific bacterial assemblages on microplastics // *Front. Microbiol*. – 2018. V. 8. – P. 2709.

ALGAL FOULING FORMATION ON PLASTIC SUBSTRATES IN KARSTIC WATER BODIES OF THE PUSTYNSKY NATURE RESERVE, NIZHNY NOVGOROD REGION (RESULTS OF A NATURAL EXPERIMENT)

Ekaterina L. Vodeneeva, Yulia M. Pichugina, Daria A. Zhurova, Ekaterina M. Sharagina, Yana V. Seredneva, Pavel V. Kulizin,

Key words: plastic, pollution, algae, fouling communities, phytoplankton, karstic water bodies, Pustynsky Nature Reserve.

Abstract. The first results of a natural experiment of algae fouling on various plastic substrates (PET, LDPE, PP, PS) in freshwater karstic water bodies located in the Pustynsky Nature Reserve (Nizhny Novgorod region) are presented in the study. The species composition of phytoplankton and phytoplankton was analyzed, and its similarity was estimated. The indicators of algae development and the complex of dominant species have been determined.

