

25.00.36
УДК 551.481

ГЕОЭКОЛОГИЯ (ПО ОТРАСЛЯМ)

Казмирук В.Д.

Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

БАРЬЕРНАЯ РОЛЬ МАКРОФИТОВ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ МИКРОПЛАСТИКОМ

DOI: 10.37493/2308-4758.2021.3.9

Введение.

Повсеместное использование пластмассовых изделий, как для производственных, так и для бытовых нужд, относительная дешевизна, легкость производства и обработки пластмасс, возможность изменять их физические и потребительские свойства, привели к тому, что этот материал стал одним из самых востребованных в жизни современного общества. Вместе с тем, массовое использование синтетических полимерных материалов породило появление нового загрязнителя окружающей среды – пластиковых микрочастиц (микропластика). В работе показано, что заросли высшей водной растительности позволяют локализовать загрязнение водных объектов микропластиком и способствуют его депонированию и захоронению.

Материалы и методы исследований.

Проведены полевые и лабораторные экспериментальные исследования по задержанию микрочастиц из полиэтилена высокой плотности зарослями тростника обыкновенного, рогоза узколистного, манника большого, аира обыкновенного, ириса желтого, осоки острой, роголистника темно-зеленого, рдеста пронзеннолистного, рдеста блестящего, рдеста плавающего, рдеста тонкого, кувшинки чисто-белой, кубышки желтой и чилима.

Результаты исследований

и их обсуждение.

Степень задержания пластиковых микрочастиц макрофитами зависит от материала их происхождения, жесткости, размера, концентрации, а также густоты, морфологических и экологических особенностей растений. Для различных видов макрофитов степень перехвата ими микрочастиц в размерном диапазоне 1–5 мм колеблется в пределах 22–100 %. Полученные результаты согласуются с материалами недавних исследований взаимодействия пластиковых микрочастиц с макрофитами морских акваторий.

Выводы.

Регулирование загрязнения поверхностных вод микрочастицами синтетических полимерных материалов наряду с другими мероприятиями может включать целенаправленное культивирование водных растений, их интродукцию и наращивание биомассы в нужное время, в нужных местах и в необходимых количествах. Такие зоны могут функционировать в автономном режиме без вмешательства человека и капитальных вложений. Для размещения и создания буферных зон из макрофитов можно использовать земли, которые не пригодны для другого применения – бывшие свалки, пустыри, балки, заболоченные места.

Ключевые слова:

микропластик, макрофиты, водные объекты, загрязнение, задержание.

Kazmiruk V.D. Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

The Barrier Role of Macrophytes in Pollution of Water Bodies with Microplastics

Introduction. The widespread use of plastic products, both for industrial and household needs, the relative cheapness, ease of production and processing of plastics, the ability to change their physical and consumer properties, led to the fact that this material has become one of the most popular in the life of modern society. At the same time, the massive use of synthetic polymer materials has given rise to the emergence of a new environmental pollutant – plastic microparticles (microplastics). It has been experimentally established that, aquatic plants make it possible to localize waters pollution by microplastics and contribute to its deposition and burial.

**Materials and methods
of research.** Field and laboratory studies was conducted to investigate the retention rate of high-density polyethylene microparticles by *Phragmites communis* Trin., *Typha angustifolia* L., *Glyceria maxima*, *Acorus calamus* L., *Iris pseudacorus*, *Carex acuta*, *Ceratophyllum demersum* L. *Potamogeton perfoliatus* L., *Potamogeton lucens* L., *Potamogeton natans*, *P. heterophyllus* × *P. Perfoliatus*, *Nymphaea candida*, *Nuphar lutea* (L.) Smith, and *Trapa natans*.

**Results and
Discussion.** It has been experimentally established that, the retention rate of plastic microparticles by macrophytes depends on the material of their origin, particle hardness, size, concentration, as well as density, morphological and ecological characteristics of plants. For various species of macrophytes, the retention rate of microparticles in the size range of 1–5 mm ranges from 22 to 100%. The obtained results showed a good agreement with the materials of recent studies on the interaction between plastic microparticles with macrophytes of marine regions.

Conclusion. The regulation of surface water pollution by microparticles of synthetic polymeric materials, along with other measures, can include targeted cultivation of aquatic plants, their introduction and biomass growth at the right time, in the right places and in the required quantities. Such zones can function autonomously without human intervention and capital investments. For the placement and creation of buffer zones with macrophytes, it is possible to use lands that are not suitable for other uses – former landfills, wastelands, small dry valleys, wetlands.

Key words: microplastics, macrophytes, water bodies, pollution, retention.

Введение

Массовое производство и повсеместное использование синтетических полимерных материалов, благодаря их дешевизне и высоким потребительским качествам, в настоящее время

породили нарастающую проблему загрязнения окружающей среды стойкими к деградации пластиковыми отходами, которые стали наиболее обычными, разнообразными и широко распространенными. Микрочастицы синтетических полимерных материалов (микропластик) сейчас обнаружены во всех природных средах – почвах, воде, воздухе, живых организмах.

Водные потоки являются основными путями переноса пластиковых микрочастиц, как со сточными водами, так и при смыве с поверхности загрязненных территорий. Кроме того, водотоки разных уровней выполняют роль транспортных коридоров при переносе микрочастиц на большие расстояния, а водоемы являются приемниками и накопителями этих микрочастиц.

Поскольку деградация и биоразложение пластиковых микрочастиц может длиться тысячи лет, их количество растет, а сбор и утилизация являются не реальной задачей, для минимизации вреда, приносимого микропластиком живым организмам пресноводных экосистем и снижения вероятности транспорта микропластика в морские экосистемы, автором впервые в мировой научной практике было предложено использовать барьерную роль макрофитов. Прибрежные макрофиты, благодаря своим свойствам, позволяют задержать и захоронить в донных отложениях пластиковые микрочастицы, поступающие со стороны берега, а также быть ловушкой для микропластиков, плавающих на поверхности и в водной толще открытой части водоемов и водотоков.

Материалы и методы исследований

Нами изучалось поведение пластиковых микрочастиц во время натурных экспериментов в прибрежной зоне Ивановского водохранилища и его притоков, а также в лабораторных условиях. Характеристики исследуемых частиц приведены в табл. В экспериментах использовались растущие (на разных стадиях развития) и отмершие растения при их различном расположении. В натурных экспериментах определенное количество пластиковых микрочастиц различной формы, состава и размера помещалось в прибрежной зоне на расстоянии 1 м от уреза воды с целью их естественного смыва во время дождей или сдува ветром в водный объект

Таблица. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДОВАННЫХ ПЛАСТИКОВЫХ МИКРОЧАСТИЦ
Table. The characteristics of microplastic particles used in this study

Базовый полимер	Вид, форма частиц	Средний размер, мм	Плотность, г/см ³	Средний вес, мг
Полиэтилен высокой плотности	Микропленки в форме полосок и квадратов, фрагменты нерегулярной формы	1,0; 2,0; 4,5	0,89–0,97	1,1
Пенополистирол	Микросферы	1,0; 3,0; 4,5	0,01–0,04	0,4

на участках шириной 1 м с прибрежной растительностью и без нее. Подсчитывалось количество частиц микропластика, находящихся на каждом метре от уреза воды и их положение: плавают на поверхности воды, опустились на дно или прикрепились к растениям. Периодичность измерений зависела от особенностей участка и погодных условий и колебалась от ежедневных до одного раза в неделю.

Проводились эксперименты для 14 видов высшей водной растительности (ВВР): воздушно-водной, погруженной и с плавающими по поверхности воды листьями при проективном покрытии растений 50 и 100% как мере их густоты.

Перечень исследованных растений приведен на рисунке. Концентрация микрочастиц на единице экспериментального участка составляла 50, 500, 1000, 3000 и 6000 шт./м². Концентрация микрочастиц 500 шт./м² была принята как основная и наиболее вероятная, поскольку является верхним пределом обнаруживаемого в настоящее время уровня загрязнения микропластиком наиболее загрязненных континентальных водных объектов (например, водохранилище Данцзянкоу (Китай) [Di et al., 2019]) и соизмерима с концентрациями, используемыми в лабораторных исследованиях, при которых наблюдается негативное воздействие микропластика на биологические объекты [Казмирук, 2020]. Пластиковые микрочастицы, которые прикреплялись к растениям, считались задержанными, а общий уровень задержания микрочастиц определялся как

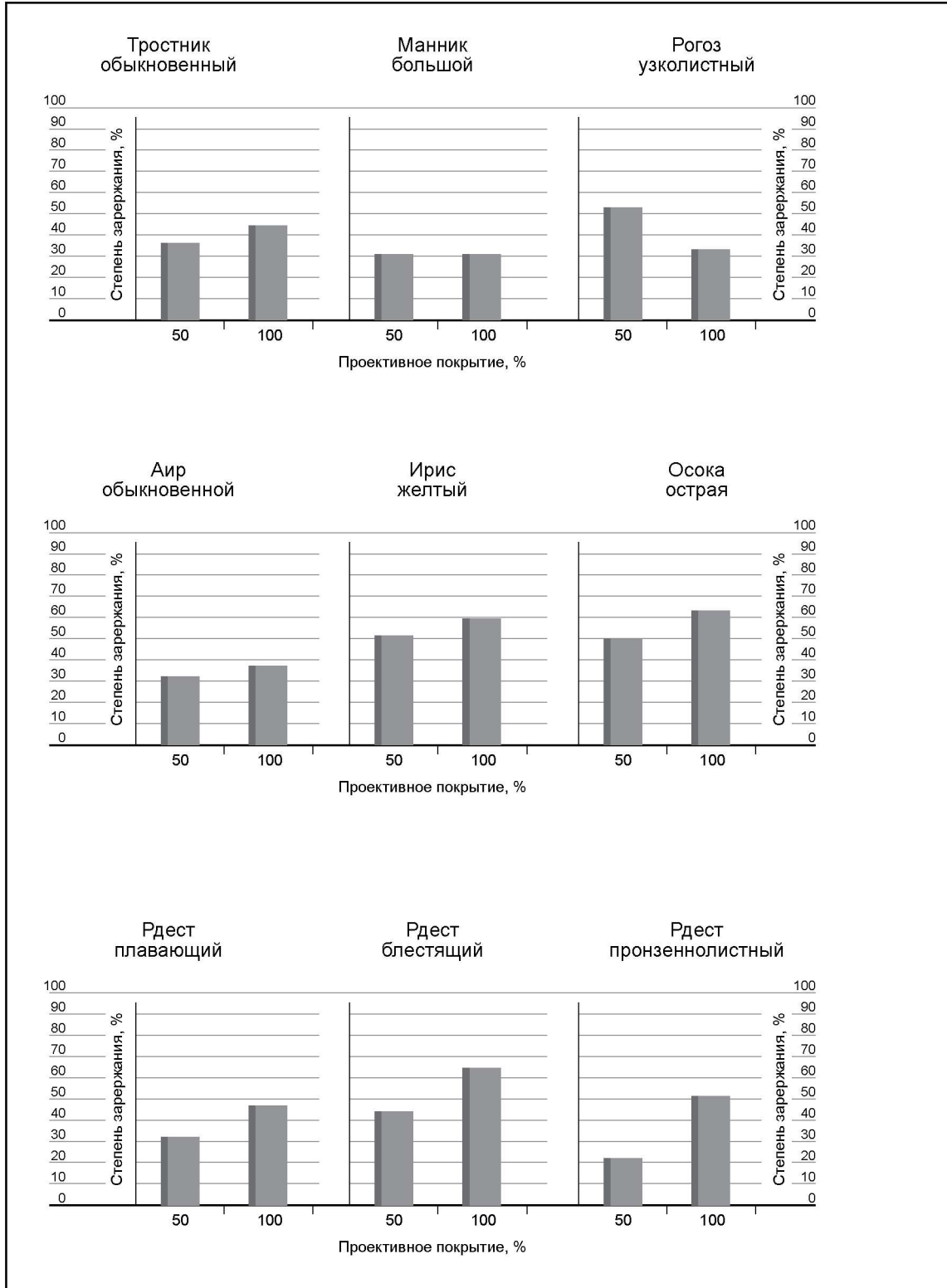
отношение прикрепленных к растениям микрочастиц к их общему количеству, выраженное в процентах. Каждый эксперимент повторялся 5–14 раз.

Результаты исследований и их обсуждение

Среди множества механизмов влияния на поведение и задержание пластиковых микрочастиц макрофитами, морфологические особенности последних и густота их произрастания имеют первостепенное значение. Степень перехвата макрофитами плавающих пластиковых микрочастиц колеблется в пределах от 22% (рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.)) до 76% (роголистник темно-зеленый (*Ceratophyllum demersum* L.)) при проективном покрытии растительностью акватории 50% и от 31% (манник большой (*Glyceria maxima*)) до 100% (кувшинка чисто-белая (*Nymphaea candida*), кубышка желтая (*Nuphar lutea* (L.) Smith), чилим (*Trapa natans*)) при проективном покрытии 100% (рис.).

Не менее важным фактором являются особенности экологии ВВР. Так рдест пронзеннолистный, хотя и имеет пространственную структуру близкую к роголистнику и оба вида являются погруженными, но при том же проективном покрытии верхушки растений рдеста значительно реже доходят до поверхности воды, чем растения роголистника. Кроме того, растения рдеста и его листья практически никогда не переплетаются, чего нельзя сказать о роголистнике, листья которого дихотомически разветвлённые и образуют плотную сетчатую структуру.

Дополнительным фактором является и то, что роголистник обычно произрастает в слабопроточных застойных зонах, слабый водообмен в которых также способствует задержанию пластиковых микрочастиц. Растения же рдеста пронзеннолистного могут выдерживать значительные механические нагрузки, этот вид встречается на участках существенного воздействия ветровых и судовых волн. Другие виды исследованной погруженной растительности при проективном покрытии 50% демонстрируют близкий уровень задержания пластиковых микрочастиц – 27–44%, а существующий разброс также легко объясним особенностями морфологии и экологии видов: редкое расположение, погру-



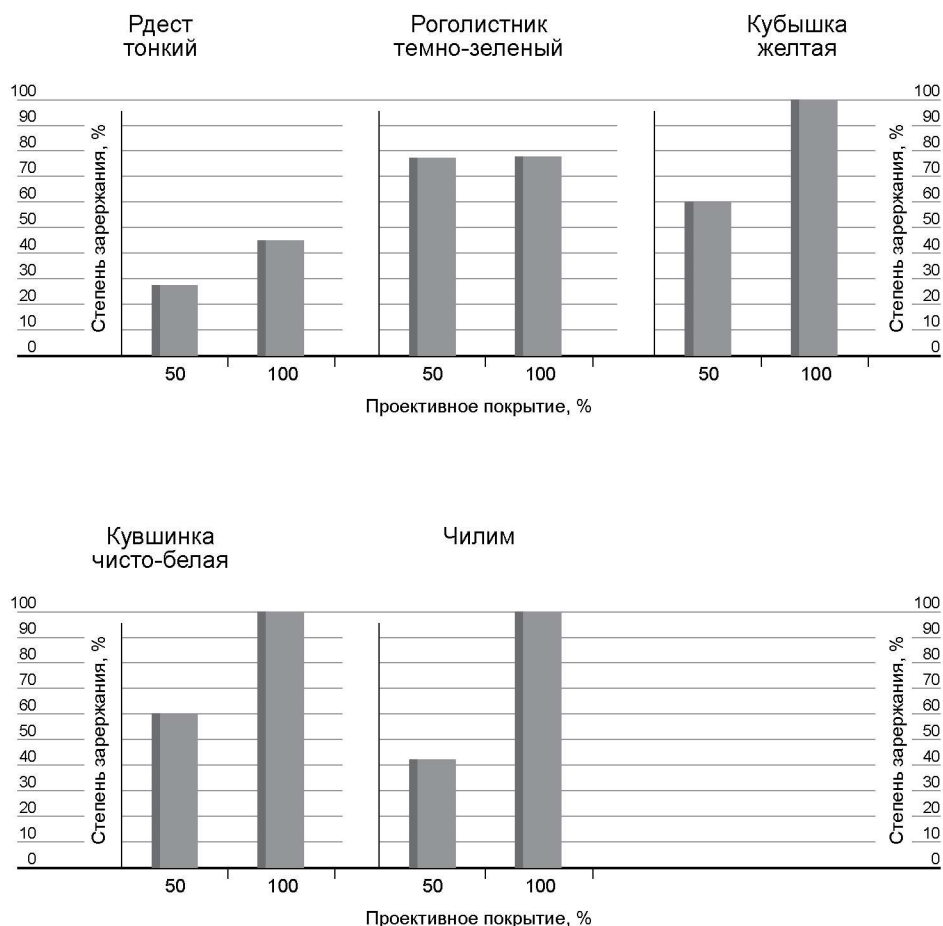


Рис.

Средняя величина степени задержания 1 м² зарослей ВВР микропленок размером 4,5 мм из полиэтилена высокой плотности при их концентрации 500 шт./м².

Fig. The average value of a retention rate of high-density polyethylene microparticles (films) 4.5 mm in size at a concentration of 500 items m⁻² by 1 m² of thickets of different species of higher aquatic plants.

женных в воду, тонких листьев (рдест тонкий (*P. heterophyllus* × *P. Perfoliatus*)) и длинное (до 7 м на Нижней Волге) растение со многими широкими и длинными листьями (до 20 см), значительная часть которого плавает на поверхности воды (рдест блестящий (*Potamogeton lucens* L.)).

Воздушно-водная растительность с проективным покрытием зарослей 50% в целом имеет более высокую степень задержания пластиковых микрочастиц 31–53%, чем погруженная, причем из 6 исследованных видов, 3 тяготеют к нижнему пределу (манник большой, аир обыкновенный (*Acorus calamus* L.), тростник обыкновенный (*Phragmites communis* Trin.)), а 3 других – к верхнему (осока острая (*Carex acuta*), ирис желтый (*Iris pseudacorus*), рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.)).

Первая группа имеет аналогичную структуру стеблей и близкую их толщину: круглое сечение диаметром 4–8 мм для тростника и эллипсовидное сечение 4×8 и 6×15 мм соответственно для манника и аира. Растения второй группы, при том же проективном покрытии акватории, или имеют толстые эллипсовидного сечения стебли со средним размером 20×35 и 20×40 мм соответственно для рогоза и ириса, или большое количество отдельных тонких листьев, как осока (поперечное сечение 2×5 мм), чем создают аналогичные условия для задержания пластиковых микрочастиц. Дополнительным фактором задержания микрочастиц осокой является специфическая поверхность растений со множеством острых выступов, на которых зацепляются и удерживаются микрочастицы. Необходимо также отметить, что воздушно-водная растительность интенсивно гасит движение воздушных масс и их воздействие на поверхность воды, в результате чего микросферы из пенополистирола не перекачиваются по ее поверхности, а имеют нейтральную плавучесть, как и плавающие микрочастицы другой формы.

Еще больше задерживают плавающие пластиковые микрочастицы растения с плавающими на поверхности воды листьями (42–60% при проективном покрытии 50%), что также связано с их морфологией и экологическими особенностями – произрастание в местах со слабым водообменом. В условиях Иваньковского водохранилища листья кубышки желтой имеют средний диаметр око-

ло 10 см или эллипсовидную форму 8×11 см. Несколько меньшая степень задержания микропленок чилимом объясняется строением, плавающей на поверхности воды, розетки, имеющей не сплошную структуры, как листья кувшинки и кубышки, а представляющей собой вздутые черенки, на которых располагаются ромбовидные листья длиной 2–3 см. При этом диаметр розетки и соответственно промежутки между листьями (пространство свободной поверхности воды) могут быть существенно больше, чем сплошные плавающие листья кувшинки и кубышки.

В условиях Иваньковского водохранилища диаметр розетки чилима изменяется в пределах 12–24 см, а по данным более ранних исследований автора, на Нижней Волге он может достигать 45 см [Казмирук, Казмирук, Бреховских, 2004]. Следует отметить, что по результатам наших опытов на р. Донховке – одном из притоков Иваньковского водохранилища, задержание легких и подвижных микрочастиц пенополистирола диаметром 4,5 мм на листьях кувшинки чисто-белой происходит при средней скорости поверхностного стокового течения до 6 см/с, хотя степень задержания микрочастиц в этом случае составляет всего 10% при таком же проективном покрытии растений около 10%. По-видимому, такая постоянная скорость течения воды является верхним пределом для произрастания этого вида.

Нет прямой зависимости между густотой растений одних и тех же видов и степенью задержания пластиковых микрочастиц. Если при проективном покрытии 50% наибольший разброс этого показателя был характерен для погруженной растительности, то при проективном покрытии 100% минимальные значения наблюдаются для многих видов воздушно-водной растительности: манник большой (31%), рогоз узколистный (33%), аир обыкновенный (36%), то есть для упомянутых видов при двукратном увеличении проективного покрытия, только у аира на 16% увеличилась степень задержания пластиковых микрочастиц. Для манника эта величина не изменилась, а для рогоза даже уменьшилась.

В последнем случае, при увеличении густоты зарослей рогоза, растения, имеющие массивные стебли, произрастают отдельными небольшими группками, не изменяя общее проективное покрытие,

но создавая более широкое свободное пространство в нижней части стеблей с более высоким водообменом, где свободно перемещаются пластиковые микрочастицы. Для других видов воздушно-водной ВВР, хотя абсолютные величины степени задержания пластиковых микрочастиц значительно выше (44–62%), относительные величины этого показателя возросли не на много (16–26%). Проявление эффекта увеличения густоты растительности с пропорциональным увеличением степени задержания плавающих микрочастиц наиболее отчетливо проявляется в зарослях осоки, имеющей тонкие листья, равномерно рассекающие поток воды или воздуха, переносящий микрочастицы.

Растения с плавающими по поверхности воды листьями при проективном покрытии 100% задерживают все микрочастицы, плавающие в пределах зоны их произрастания. При таком же проективном покрытии погруженная ВВР в своей массе занимает промежуточное положение по степени задержания пластиковых микрочастиц между воздушно-водной и растительностью с плавающими по поверхности воды листьями. Кроме роголистника, у которого, благодаря его морфологическим и экологическим особенностям, степень задержания микрочастиц была самой высокой среди всех исследованных видов ВВР при проективном покрытии 50%, для других погруженных видов, с увеличением их густоты, степень задержания микрочастиц выросла на 45–131%, что в несколько раз выше, чем для воздушно-водной ВВР. Роголистник одинаково задерживал микрочастицы при сплошном зарастании и в более редких зарослях, оставаясь при этом самым эффективным улавливателем микрочастиц среди погруженной ВВР.

Рдесты, плавающий (*Potamogeton natans*) и блестящий, имеют похожую пространственную структуру, при увеличении их густоты аналогично увеличили степень задержания пластиковых микрочастиц на 48 и 45% соответственно. При этом рдест блестящий по эффективности задержания микрочастиц (64%) приблизился к роголистнику (76%). Больше всего, среди погруженной ВВР, при увеличении густоты зарослей возросла эффективность задержания пластиковых микрочастиц у рдеста пронзеннолистного (в 2,3 раза). По-видимому, это связано с выходом на поверхность воды большего количества растений.

А вот рдест тонкий, хотя и увеличил степень задержания микрочастиц на 63 % при сгущении зарослей, остался наименее эффективным барьером для задержания пластиковых микрочастиц среди погруженной ВВР – на уровне тростника с таким же проективным покрытием. Оба упомянутые вида рдестов (пронзеннолистный и тонкий) при проективном покрытии 100 % имеют примерно одинаковое расстояние между растениями – около 5 см.

Уменьшение среднего размера микропленок из того же материала (полиэтилен высокой плотности) с 4,5 до 1,0 мм привело к снижению задержания пластиковых микрочастиц роголистником на 42 и 12 % соответственно для проективного покрытия 50 и 100 %. Скорее всего, более мелкие частицы свободнее проходят через решетчатую структуру из стеблей и листьев роголистника. Опыты по влиянию размера пластиковых микрочастиц на степень их задержания ВВР проводились только для этого вида.

На барьерную роль ВВР по задержанию плавающих пластиковых микрочастиц также влияет их концентрация на поверхности воды в пределах зарослей. Детальные исследования проводились для тростника обыкновенного. Концентрация микропленок со средним размером 4,5 мм изменялась в пределах 50–6000 шт./м². Для обоих исследованных проективных покрытий ВВР график изменения степени задержания микрочастиц тростником от их концентрации имеет S-образную форму.

Сперва, с увеличением концентрации пластиковых микрочастиц, увеличивается и степень их задержания тростником, но примерно при концентрации 700–800 шт./м² происходит изменение направленности процесса – относительно большее количество пластиковых микрочастиц начинает беспрепятственно проходить сквозь заросли ВВР. При концентрации пластиковых микрочастиц 3000 шт./м² задерживаются только 17 и 26 % соответственно для 50 и 100 % проективного покрытия зарослей тростника. При дальнейшем увеличении концентрации пластиковых микрочастиц происходит их слипание, запруживание узких мест между растениями, возникают цепочки прикрепившихся друг к другу микропленок. Это приводит к повторному увеличению степени задержания микрочастиц тростником и при концентрации 6000 шт./м² она составляет 41 и

57% соответственно при проективном покрытии 50 и 100%, что на 14 и 29% выше, чем степень задержания при базовой исследованной концентрации 500 шт./м². Однако, не для всех макрофитов увеличение концентрации микрочастиц на порядок приводит к увеличению степени их задержания. Для манника большого эта величина осталась на том же уровне, а для осоки даже наблюдалось относительное снижение.

Поведение пластиковых микрочастиц в водной среде, связанное с материалом их происхождения (не обязательно материалом полимерной матрицы), формой, степенью жесткости, также сказывается на их способности задерживаться зарослями ВВР. Проведенные нами эксперименты с микрофрагментами из полиэтилена высокой плотности показали разную степень задержания, как более высокую, так и более низкую, по сравнению с микропленками из того же полимерного материала и такого же размера. Для исследованных видов ВВР (ирис желтый, рдест тонкий, роголистник темно-зеленый) при проективном покрытии 50% степень задержания микрофрагментов имеет близкие значения (41–51%). Как и для микропленок, наиболее слабым барьером является рдест тонкий, что вполне объяснимо его морфологическими особенностями, хотя он и задерживает микрофрагменты в полтора раза интенсивнее, чем микропленки. Несколько лучше (49%) пластиковые микрофрагменты задерживаются в близком к рдесту по морфологии роголистнике, однако это значительно меньше, чем для микропленок (76%). Ирис же при проективном покрытии 50% демонстрирует одинаковую степень задержания микрочастиц в виде фрагментов и пленок, чего нельзя сказать при его густоте 100%. При этой густоте проявляется эффект формирования микропоранов с повышенным водообменом, куда устремляются плавающие микрочастицы, как это имело место в густых зарослях рогоза узколистного. Как результат, степень задержания микрофрагментов в густых зарослях ириса ниже, чем в более редких с проективным покрытием 50%. Этот эффект не проявил себя при исследовании задержания этим видом микропленок.

По-видимому, повлияла разная степень адгезии поверхностей микрофрагментов и микропленок к поверхности стеблей ириса. Два

других, исследованных вида ВВР, при увеличении их густоты, пропорционально увеличивали степень задержания пластиковых микрофрагментов на 29 и 18% соответственно для рдеста тонкого и роголистника темно-зеленого.

При уменьшении среднего размера пластиковых микрофрагментов до 1,0 мм, также, как и для микропленок происходит пропорциональное снижение степени задержания микрочастиц исследованными зарослями роголистника в равной степени на 5% по абсолютной величине при проективном покрытии 50 и 100%. Для исследованного рдеста тонкого эта величина практически не изменилась, хотя и несколько уменьшилась.

Полученные нами данные о перехвате ВВР пластиковых микрочастиц сопоставимы с данными работы [Horvath, 2004], который исследовал задержание макрофитами фрагментов листьев дуба и проводил натурные эксперименты, моделируя эти фрагменты кусочками бумаги диаметром 6 мм. В русле водотока присутствовали заросли незабудки болотной (*Myosotis palustris* (L.) L.), сердечника (*Cardamine* sp.) и ежеголовника прямого (*Sparganium erectum* L. (*S. ramosum* Huds.)), тогда как прибрежная растительность была представлена таволгой вязолистной (*Filipendula ulmaria* L.), ситником развесистым (*Juncus effusus* L.) и другими ситниковыми, произрастающими по обеим берегам. Был получен уровень перехвата микрочастиц 28–100%.

Косвенным подтверждением эффективности задержания микропластика ВВР могут быть недавно опубликованные данные о нахождении пластиковых микрочастиц на 94% отобранных растений взморника (*Zostera marina*) в Шотландии [Jones et al., 2020]. Для этого же вида в лабораторных условиях было получено, что при скоростях движения воды менее 12 см/с, 40–90% предпроизводственных микрогранул из полипропилена, полиэтилентерефталата, полистирола и полиамида или не движутся, или задерживаются растениями [De los Santos, Krång, Infantes, 2021]. Сопоставимые данные получены для зарастающих зон Балтийского моря. Придонная вода в этих зонах на два порядка содержит больше пластиковых микрочастиц с размерным диапазоном 0,2–5 мм, чем зоны, где растительность отсутствует [Esiukova et al., 2021].

Поскольку ВВР имеет сезонную динамику, эффективность задержания ею плавающих пластиковых микрочастиц также будет меняться. Среди исследованных видов первыми исчезают с поверхности воды верхушки погруженных макрофитов. На водоемах средней полосы России это происходит в конце августа – начале сентября. Так рдест пронзеннолистный, после отмирания фрагментируется и теряет целостность листьев и верхней части стеблей за 5–6 дней. В таком же состоянии рдест тонкий на 10–11 сутки погружается в воду и постепенно опускается на дно.

Этого времени достаточно, чтобы, прикрепленные к растениям, микропленки из полиэтилена высокой плотности также опустились на дно вместе с растениями или самостоятельно. В лабораторных опытах с микропленками со средним размером 4,5 мм, через 65 часов более 10% микрочастиц становятся прикрепленными к воздушно-водным растениям в толще воды, что составляет примерно половину погружившихся микрочастиц. Для роголистника темно-зеленого, при среднем размере микропленок около 1 мм, уже через 15–16 часов 2/3 микрочастиц оказываются прикрепленным к растениям в толще воды.

Воздушно-водная растительность более длительное время выполняет прямую барьерную функцию, которая при ее отмирании на некоторое время даже может возрасти, поскольку листья большинства видов этих растений (кроме тростника) опускаются на поверхность воды, увеличивая площадь акватории, покрытую ими. Кроме того, увеличивается степень адгезии микрочастиц к листьям и стеблям, подверженным деградации. Заросли же тростника в том или ином виде сохраняются круглый год. В местах контакта растений с переменным уровнем воды, при динамическом воздействии ветровых и судовых волн листья тростника деградируют быстрее и исчезают совсем, еще в период вегетации.

Однако, некоторое уменьшение густоты зарослей в результате потери листьев и возможное снижение степени задержания пластиковых микрочастиц, компенсируется повышением шероховатости, состарившихся к этому времени, стеблей, таким образом, окончание вегетационного периода тростника заметным образом не влияет на его барьерную роль.

Выводы

Способность макрофитов и фрагментов уже погибших наземных частей растений задерживать и накапливать пластиковые микрочастицы, особенно в прибрежных зонах водных объектов, имеет важное водоохранное значение. Для водных объектов, расположенных на урбанизированных территориях, буферные зоны из ВВР позволяют избежать или значительно снизить воздействие на водные экосистемы постоянных потоков пластиковых микрочастиц и связанных с ними загрязняющих веществ, поступающих с талыми, ливневыми и мочными стоками с городских территорий, авто- и железных дорог, территорий аэропортов, промышленных зон, полигонов ТБО, стихийных свалок. Если водные объекты имеют значительные размеры, буферные зоны дают возможность осуществлять комплексную защиту реки или озера в местах расположения населенных пунктов и различных производств.

Эксперименты для 14 видов ВВР: воздушно-водной, погруженной и с плавающими по поверхности воды листьями при проективном покрытии растений 50 и 100% показали, что для плавающих микрочастиц в виде микропленок и микрофрагментов из полиэтилена высокой плотности, которые часто составляют более 50% обнаруживаемых в водных объектах микрочастиц, степень перехвата макрофитами колеблется в пределах от 22 до 76% при проективном покрытии растительностью акватории 50% и от 31 до 100% при проективном покрытии 100%.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы № 0147–2019–0002 (№ государственной регистрации АААА-А18–118022090104–8) Государственного задания ИВП РАН.

Библиографический список

1. Di M., Liu L., Wang W., Wang J. Manuscript prepared for submission to environmental toxicology and pharmacology pollution in drinking water source areas: Microplastics in the Danjiaokou Reservoir, China // Environ. Toxicol. Pharmacol. 2019.

Vol. 65. P. 82–89.

2. Казмирук В.Д. Микропластик в окружающей среде: Нарастающая проблема планетарного масштаба. М.: URSS, 2020. 432 с.
3. Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н., Бреховских В.Ф. Зарастающие водотоки и водоемы: Динамические процессы формирования донных отложений. М.: Наука, 2004. 310 с.
4. Horvath T.G. Retention of particulate matter by macrophytes in a first-order stream // *Aquat. Bot.* 2004. Vol. 78. No 1. P. 27–36.
5. Jones K.L., Hartl M.G.J., Bell M.C., Capper A. Microplastic accumulation in a *Zostera marina* L. bed at Deerness Sound, Orkney, Scotland // *Mar. Pollut. Bull.* 2020. Vol. 152. 110883.
6. De los Santos C.B., Krång A.-S., Infantes E. Microplastic retention by marine vegetated canopies: Simulations with sea-grass meadows in a hydraulic flume // *Environ. Pollut.* 2021. Vol. 269. 116050
7. Esiukova E.E., Lobchuk O.I., Volodina A.A., Chubarenko I.P. Marine macrophytes retain microplastics // *Mar. Pollut. Bull.* 2021. Vol. 171. 112738.

References

1. Di M., Liu L., Wang W., Wang J. Manuscript prepared for submission to environmental toxicology and pharmacology pollution in drinking water source areas: Microplastics in the Danjiangkou Reservoir, China // *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 2019. Vol. 65. P. 82–89.
2. Kazmiruk V.D. Microplastics in the environment: A growing global scale challenge. М.: URSS, 2020. 432 p. (In Russ.)
3. Kazmiruk V.D., Kazmiruk T.N., Brekhovskikh V.F. Overgrown Streams and Reservoirs: Dynamic Processes of Formation of Bottom Sediments, М.: Nauka Press, 2004. 310 p. (In Russ.)
4. Horvath T.G. Retention of particulate matter by macrophytes in a first-order stream // *Aquat. Bot.* 2004. Vol. 78. No 1. P. 27–36.
5. Jones K.L., Hartl M.G.J., Bell M.C., Capper A. Microplastic accumulation in a *Zostera marina* L. bed at Deerness Sound, Orkney, Scotland // *Mar. Pollut. Bull.* 2020. Vol. 152. 110883.
6. de los Santos C.B., Krång A.-S., Infantes E. Microplastic retention by marine vegetated canopies: Simulations with sea-grass meadows in a hydraulic flume // *Environ. Pollut.* 2021. Vol. 269. 116050.
7. Esiukova E.E., Lobchuk O.I., Volodina A.A., Chubarenko I.P.

Marine macrophytes retain microplastics // Mar. Pollut. Bull.
2021. Vol. 171. 112738.

**Поступило в редакцию 25.08.2021,
принята к публикации 01.09.2021.**

Об авторах

Казмирук Василий Данилович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт водных проблем Российской академии наук, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, Researcher ID P-3332-2014
E-mail: kazm@iwp.ru, Телефон: +7-910-938-26-66

About the authors

Kazmiruk Vasily Danilovich, PhD (Geogr.), Senior Research Scientist, Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina 3, Moscow, 119333, Researcher ID P-3332-2014
E-mail: kazm@iwp.ru. Phone: +7-910-938-26-66