

Механизмы перехвата пластиковых микрочастиц буферными зонами из макрофитов

© 2021 В. Д. Казмирук

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

**E-mail: kazm@iwp.ru*

Резюме. Загрязнение окружающей среды стойкими к деградации микрочастицами синтетических полимерных материалов (микропластиком) в наши дни становится одной из нарастающих глобальных проблем. Вместе с тем исследования о поведении пластиковых микрочастиц в окружающей среде находятся лишь в начальной стадии, как и разработка методов предотвращения и регулирования загрязнения водных объектов микропластиком. Автором впервые в мировой научной практике для этих целей было предложено использовать барьерную роль макрофитов. На основе натуральных и лабораторных экспериментов с пластиковыми микрочастицами с различной полимерной матрицей (полиэтилен, полистирол, полиэтилентерефталат, полиэстер) и воздушно-водной и погруженной растительностью, а также растениями с плавающими на поверхности воды листьями установлен ряд механизмов, прямо и опосредованно ведущих к задержанию микропластика макрофитами. По преобладанию того или иного физического процесса эти механизмы можно объединить в четыре группы: 1) появление дополнительных сопротивлений перемещению водных и воздушных масс. Изменение кинематической структуры потоков воды и воздуха способствует замедлению движения микрочастиц, их осаждению и задержанию растениями; 2) гашение кинетической энергии ветровых волн и дождевых капель зарослями макрофитов предотвращает повторное перемещение уже задержанных микрочастиц; 3) механическое задержание пластиковых микрочастиц происходит в результате существования неровностей в структуре растений, ситоподобных структур из переплетений стеблей и листьев, объемной массы растительного опада, адгезии поверхностей растений и микрочастиц, что усиливается липкими поверхностями перифитона; 4) притягивание и прилипание пластиковых микрочастиц к растениям и друг к другу происходит в результате взаимодействия электрических полей.

Ключевые слова: микропластик, макрофиты, загрязнение, водный объект, задержание микрочастиц

Mechanisms of plastic microparticles retention by buffer zones with macrophytes

Vasily D. Kazmiruk

Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: kazm@iwp.ru*

Abstract. Environmental pollution by resistant to degradation microparticles of synthetic polymer materials (microplastics) is one of the growing global problems nowadays. At the same time, research on the behavior of plastic microparticles in the environment is only at an early stage, as well as the development of methods for preventing and regulating microplastic contamination of water bodies. For the first time in world scientific practice, the author proposed to use the barrier role of macrophytes for these purposes. A number of mechanisms directly and indirectly leading to the microplastic retention by macrophytes have been identified based on field and laboratory experiments with plastic microparticles with different polymer matrix (polyethylene, polystyrene, polyethylene terephthalate, polyester) and air-water and immersed vegetation, as well as plants with leaves floating on the water surface. According to the predominance of a particular physical process, these mechanisms can be combined into four groups: (1) The appearance of additional resistance to the movement of water and air masses. Change in the kinematic structure of water and air flows promotes slowing down the movement of microparticles, their sedimentation and retention by plants; (2) Decreasing the kinetic energy of wind waves and raindrops by thickets of macrophytes prevents repeated movement of already trapped microparticles; (3) Mechanical retention of plastic microparticles occurs as a result of the existence of irregularities in the structure of plants, sieve-like structures made of interweaving of stems and leaves, the bulk of plant litter, adhesion of plant

surfaces and microparticles, which is enhanced by the sticky surfaces of the periphyton; (4) The attraction and adhesion of plastic microparticles to plants and to each other occurs as a result of the interaction of electric fields.

Keywords: microplastics, macrophytes, contamination, water body, microparticle retention

Для цитирования: Казмирук В.Д. Механизмы перехвата пластиковых микрочастиц буферными зонами из макрофитов. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 4, с. 378–388.

<https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.4.378-388>

Благодарности и финансирование

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

Автор признателен анонимным рецензентам за внимательное прочтение статьи, замечания и предложения.

Введение

Обширное применение пластмассовых изделий, многие из которых имеют короткий период эксплуатации или разовое использование, длительный период естественной деградации синтетических полимеров, серьезные трудности и дороговизна вторичной переработки пластмасс стали причинами огромного количества бытового и промышленного пластикового мусора. Даже в первичном виде этот мусор сам по себе является опасным для окружающей среды, а при разрушении его опасность возрастает во много раз. Мелкие частицы синтетических полимерных материалов получили обобщающее название – микропластик. Он обнаружен уже во всех природных средах – почвах, воде, воздухе, живых организмах. Имея малые размеры, высокие сорбционные свойства и мобильность, эти частицы способны переносить высокотоксичные загрязнители и проникать в живые организмы, оказывая как мгновенное, так и долговременное негативное влияние на всех уровнях, от генетического до популяционного [Bai et al., 2021; Kukkola et al., 2021; Sendra et al., 2021].

Высшие водные растения (ВВР), пресноводные и морские, самостоятельно или в качестве составной части прибрежных ветлендов, способны эффективно перехватывать, накапливать и депонировать как природные органические и минеральные, так и антропогенные микрочастицы, включая микропластик, поступающие с суши в водные объекты или находящиеся в них, но в результате водообмена оказавшиеся в зарастающей зоне. Так, еще в 1980-е годы было показано, что только ежеголовник прямой *Sparganium erectum* L. (*S. ramosum* Huds.), который занимает около 10 % территории в отмелой зоне устьевого взморья Волги,

For citation: Kazmiruk V.D. Mechanisms of plastic microparticles retention by buffer zones with macrophytes. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 378–388. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.4.378-388>

Acknowledgements and Funding

The study was carried out within the framework of the state assignment of the IWP RAS No. АААА-А18-118022090104-8.

The Author is grateful to the anonymous Reviewers for the careful reading of the paper, comments and suggestions.

способен удержать до 10 % годового твердого стока реки, т.е. 0.64 млн т [Казмирук и др., 2004]. Позже сходные результаты были получены в результате натурных экспериментов для частиц органического вещества (бумаги), которой моделировались фрагменты листьев дуба. Была получена эффективность задержания микрочастиц 26–100 % [Horvath, 2004].

Недавние исследования показали, что макрофиты и в целом зарастающие зоны могут задерживать значительное количество пластиковых микрочастиц. Натурные и лабораторные эксперименты, проведенные автором с 14 видами ВВР, показали, что степень задержания микрочастиц на основе полиэтилена высокой плотности (микропленки и микрофрагменты) в размерном диапазоне 1–5 мм составляет 22–100 % [Казмирук, 2021]. Имеются данные о нахождении пластиковых микрочастиц на 75 % отобранных растений талассии черепаховой (*Thalassia testudinum* Banks & Sol. ex K.D. Koenig) у побережья атолла Тернефф (Белиз) [Goss et al., 2018] и на 94 % растений взморника (*Zostera marina* L.) в Шотландии [Jones et al., 2020]. Для последнего вида в лабораторных условиях было получено, что при скоростях движения воды менее 12 см/с 40–90 % микрогранул из полипропилена, полиэтилентерефталата, полистирола и полиамида или не движутся, или задерживаются растениями [Santos et al., 2021]. Сопоставимые данные получены для зарастающих зон Балтийского моря. Придонная вода в этих зонах содержит на два порядка больше (92.5 %) пластиковых микрочастиц размером 0.2–5 мм, в основном микроволокна, чем зоны, где растительность отсутствует (1– 1.1 шт./л) [Esiukova et al., 2021]. На важность растительности соленых маршей в трансформации стока

пластиковых микрочастиц, поступающих с суши в море, указывается также в работе [Stead et al., 2020] на основе полевых исследований в приливном эстуарии Саутгемптон-Вотер (Великобритания).

Хотя исследования взаимодействия пластиковых микрочастиц и макрофитов, а также их поведения в зарастающих зонах находятся только в начальной стадии, важно понять возможные механизмы этого взаимодействия. О том, что таких механизмов может быть несколько и что макрофиты могут играть существенную роль в поведении и конечной судьбе пластиковых микрочастиц, говорится и в недавно опубликованной работе [Kaččíková, 2020].

Целью данной работы является рассмотрение причин и механизмов, в результате которых пластиковые микрочастицы, попавшие в водный объект и перемещающиеся на поверхности воды, в ее толще или находящиеся на дне (в придонной области), оказываются задержанными в зарослях макрофитов. На основе натуральных и лабораторных экспериментов с пластиковыми микрочастицами с различной полимерной матрицей (полиэтилен, полистирол, полиэтилентерефталат, полиэстер) и воздушно-водной и погруженной растительностью, а также растениями с плавающими на поверхности воды листьями было установлено 12 механизмов, прямо и опосредованно ведущих к задержанию микропластика макрофитами.

Материал и методы исследования

Изучалось поведение пластиковых микрочастиц в апреле–сентябре 2020 г. во время натуральных экспериментов в прибрежной зоне Ивановского водохранилища, его притоков и малых водоемах Тверской области (рис. 1), а также в лабораторных условиях. Характеристики исследуемых частиц приведены в табл. 1. В экспериментах использовались растущие (на разных стадиях развития) и отмершие растения при их различном расположении. Густота произрастания также варьировала. В натуральных экспериментах определенное количество пластиковых микрочастиц различной формы, состава и размера помещали в прибрежной зоне на расстоянии 1 м от уреза воды с целью их естественного смыва во время дождей или сдува ветром в водный объект на участках шириной 1 м с прибрежной растительностью и без нее. На участках измерялись глубина и скорость течения воды, высота, длина и частота ветровых и судовых волн, уклон дна

и тип донных отложений, количество растений на 1 м² акватории, диаметр растений, определялось проективное покрытие ВВР, ежедневно фиксировалась скорость и направление ветра, наличие или отсутствие дождя. 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. В естественных условиях опыты проводились при высоте волн в прибрежной зоне 3.5–6.5 см, их длине 1.5–4.2 м и частоте 0.25–0.50 1/с.

Автором проводились эксперименты для 14 видов ВВР: воздушно-водной, погруженной и с плавающими по поверхности воды листьями при проективном покрытии растений 50–100 % как мере их густоты. Концентрация микрочастиц на единице экспериментального участка составляла 50, 500, 1000, 3000 и 6000 шт./м². Концентрация частиц 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



Рис. 1. Задержание микрочастиц пенополистирола манником большим *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb.

Fig. 1. Retention of expanded polystyrene microparticles by *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb.

Таблица 1. Характеристики исследованных пластиковых микрочастиц
Table 1. The characteristics of microplastic particles used in this study

Базовый полимер	Вид, форма частиц	Средний размер, мм	Плотность, г/см ³	Средняя масса, 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
Полиэтилентерефталат	Хлопья нерегулярной формы	4.3	0.96–1.45	1.8
Полиэстер	Микронити, микроволокна	2.5	1.24–2.30	0.3

воздействие микропластика на биологические объекты [Казмирук, 2020]. Пластиковые частицы, которые прикреплялись к растениям, считались задержанными, а общий уровень задержания микрочастиц определяли как отношение прикрепленных к растениям частиц к их общему количеству, выраженное в процентах.

Лабораторные опыты выполнялись в сосудах объемом 5 л, в которые помещалось фиксированное количество пластиковых микрочастиц и срезанные на водоеме растения или их фрагменты. Отдельным вопросом было исключение или минимизация влияния стенок, так как пластиковые микрочастицы имеют хорошую способность прилипать к стенкам стеклянных сосудов или даже ползти по ним вертикально вверх. Это особенно характерно для частиц полистирола, плотность которого немного выше плотности воды и частицы которого, в зависимости от концентрации и размера, могут не полностью рассеиваться в воде [Eitzen et al., 2019], а также легких частиц пенополистирола. Способность частиц пенополистирола подниматься по стенкам стеклянных сосудов (даже сухим) делает крайне затруднительным проведение лабораторных экспериментов. Для минимизации влияния стенок лабораторных сосудов на результаты экспериментов использовались широкие сосуды диаметром не менее 40 см, растения располагались на расстоянии не ближе 5 см от стенок, а прикрепившиеся к стенкам в результате опытов микрочастицы исключались из общего подсчета и дальнейшего рассмотрения.

Были выполнены серии опытов с микрочастицами различного размера, формы и состава, с однородными характеристиками или в смеси. Состояние растений варьировало от живых, в различной стадии роста, до частично разложившихся, включая искусственно высушенные и отмершие. Помимо естественно спокойного состояния водной среды искусственно создавались перемешивание воды и волновые движения. Ежечасно подсчитывалось количе-

ство пластиковых микрочастиц, прилипших и задержанных стеблями, ветвями и листьями растений. В натуральных и лабораторных условиях каждый эксперимент повторялся 5–14 раз.

Результаты и обсуждение

Характерной особенностью пластиковых микрочастиц, определяющих их поведение в окружающей среде, является плотность. Среди всех встречающихся в водных объектах микропластик способен и плавать на поверхности воды, и находиться в ее толще, концентрируясь на разных глубинах, и залегать на дне, смешиваясь с другими минеральными, органическими и антропогенными частицами, и перемещаться в вертикальной плоскости, то опускаясь на дно, то всплывая на поверхность воды. Такое поведение связано, прежде всего, с плотностью полимерных материалов, близкой к плотности воды, в результате чего пороговые значения характеристик плавучести под действием множественных гидроэкологических процессов могут быть легко преодолены в ту или другую сторону. Эти закономерности принципиально отличаются от закономерностей динамики взвешенных минеральных частиц такого же размера, которые в стационарных условиях концентрируются у дна.

Плотность частиц влияет на скорость их осаждения в водной среде. Реальные осаждающиеся частицы микропластика представляют собой полидисперсную взвесь с большим диапазоном размеров и форм. Кроме того, скорость осаждения частиц зависит от скорости перемещения водных масс, что определяется сложным комплексом внешних условий. Макрофиты, занимающие определенную часть водной толщи или всю водную толщу, создают особые условия движения воды в этой области и ее окрестностях. Такие характеристики растительности, как форма, гибкость и высота, оказывают существенное влияние на структуры потока. Растительность создает допол-

нительные гидравлические сопротивления, чем усиливает гашение кинетической энергии потока, способствует снижению скоростей движения воды и ее транспортирующей способности, уменьшению интенсивности турбулентного перемешивания, трансформации и затуханию ветровых волн. Водообмен на зарастающих участках уменьшается на 1–2 порядка. Коэффициенты гидравлической шероховатости таких участков в 4–6 раз выше, чем на незаросших акваториях [Казмирук, 1990].

Снижение водообмена и в целом гидродинамической активности водных масс происходит также за счет снижения скорости ветра у поверхности воды на участках, заросших жесткой воздушно-водной растительностью. На таких участках скорость ветра уменьшается в 6–10 раз по сравнению с аналогичными открытыми участками. Развитию турбулентного перемешивания от ветрового воздействия препятствует и погруженная растительность, верхушки которой находятся над водой, а также растения с плавающими по поверхности воды листьями. Существует тесная обратная связь между волновыми гидродинамическими характеристиками в прибрежной зоне водных объектов и структурой ценозов ВВР. Интенсивное гашение жесткой воздушно-водной растительностью энергии набегающих волн, как ветровых, так и приливных, отмечается во многих работах [Chen et al., 2007; Luther, Leonard, 1995; Quartet et al., 2007]. Таким образом, опосредованно, через снижение уровня гидродинамической активности водных масс, заросли всех групп макрофитов задерживают пластиковые микрочастицы через их осаждение в зарастающих зонах, а также препятствуют повторному взмучиванию частиц, находящихся на дне.

Поток, обтекающий растения, имеет сложную кинематическую структуру. На режим обтекания влияет гибкость растений. По-разному происходит обтекание погруженной и воздушно-водной растительности. Перед растениями возникает подпор водной поверхности, который может иметь как общий, так и локальный характер. В тыльной части растений по отношению к набегающему потоку формируются водоворотные зоны, где накапливаются захваченные микрочастицы. Такие же зоны образуются за группой растений, произрастающих отдельно. Ширина этих зон примерно равна ширине препятствия (растения или их группы), а длина примерно в 10–12 раз больше ширины. Результирующая скорость в зоне завихрения значительно меньше фоновых ско-

ростей и может быть направлена против общего течения воды. В зоне завихрения происходит интенсивное осаждение всех взвешенных частиц, включая микропластик. Кроме того, на несколько порядков увеличивается время нахождения пластиковых микрочастиц непосредственно у поверхности растений, что увеличивает вероятность адгезии поверхностей микропластика и растений, а также агрегации микрочастиц.

Полог из воздушно-водных растений, а также растения с плавающими по поверхности воды листьями способствуют гашению кинетической энергии дождевых капель и снижают вероятность их прямого воздействия на плавающие и уже задержанные микрочастицы. Растения погруженных видов, видов с плавающими на поверхности воды листьями и свободноплавающие задерживают тяжелые частицы (например, частицы полиэтилентерефталата) на своей поверхности или поддерживают их на поверхности воды, не давая им погрузиться в воду и опуститься на дно. Ту же самую функцию выполняет фитопланктон, особенно когда из него формируются поверхностные пленки. Кроме того, все эти группы растений, находясь на поверхности воды, своим присутствием «армируют» поверхностную микропенку воды, не давая ей разрушиться при взаимодействии воздушных масс и поверхности воды.

Среди механизмов влияния на поведение и задержание пластиковых микрочастиц первостепенное значение имеют морфологические особенности макрофитов и густота их произрастания. Густоту растительности можно описать несколькими параметрами: объем растений в 1 м³ воды, количество растений на единицу площади, расстояние между растениями, проективное покрытие. Между всеми этими параметрами существует связь. В табл. 2 приведены характерные значения показателей густоты для некоторых видов ВВР в условиях средней полосы России. В общем случае связи между показателями густоты ВВР являются нелинейными, так как при сгущении зарослей происходит перекрывание верхних частей отдельных растений. Именно перекрывание и переплетение листьев и стеблей растений формирует сетеподобную структуру зарослей, где задерживаются пластиковые микрочастицы. Это особенно выражено у воздушно-водных растений. При сплошном зарослях с проективным покрытием около 100 % количество растений на единице площади и диаметр их стеблей могут существенно различаться (рис. 2).

Таблица 2. Связь между проективным покрытием и количеством растений на единице площади для некоторых видов ВВР

Table 2. The relationship between the projective cover and the number of plants per unit area for some species of higher aquatic plants

Вид ВВР	Проективное покрытие, %	Количество растений, шт./м ²
Манник большой <i>Glyceria maxima</i> (Hartm.) Holmb.	20	18
	80	28–36
Осока острая <i>Carex acuta</i> L.	100	625
Рдест плавающий <i>Potamogeton natans</i> L.	70	35
Кувшинка чисто-белая <i>Nymphaea candida</i> C. Presl.	15	11
Кубышка желтая <i>Nuphar lutea</i> (L.) Smith.	50	18
	90	36–38

В зависимости от особенностей морфологии различных видов ВВР, их пространственной структуры, наличия или отсутствия неровностей на стеблях и листьях степень задержания пластиковых микрочастиц, даже при одинаковой густоте зарослей, может существенно различаться. Неудивительно, что больше всего плавающих микрочастиц задерживают растения с плавающими по поверхности воды листьями, хотя и здесь есть различия. Так, чилим (*Trapa natans* L.) задерживает пластиковых микропластиков на 16–18 %* меньше, чем другие виды с аналогичной морфологией (кувшинка чисто-белая и кубышка желтая) при том же проективном покрытии. Несколько меньшая степень задержания чилимом микропластиков объясняется строением плавающей на поверхности воды розетки, имеющей не сплошную структуру, как листья кувшинки и кубышки, а представляющей собой вздутые черенки, на которых располагаются ромбовидные листья

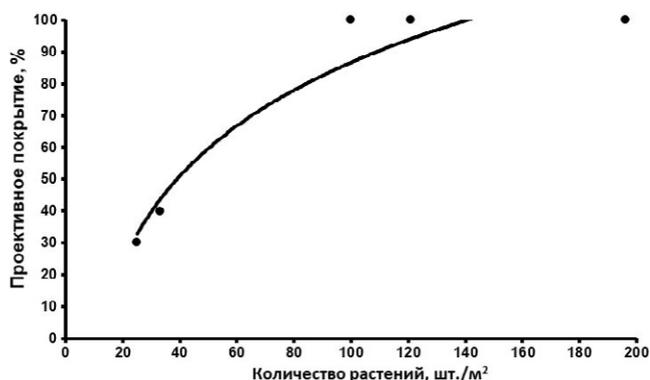


Рис. 2. Связь между количеством растений на 1 м² и проективным покрытием зарослей тростника обыкновенного *Phragmites communis* Trin.

Fig. 2. The relationship between the number of plants per square meter and the projective cover of common reed (*Phragmites communis* Trin.) thickets.

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.

Различия в степени задержания пластиковых микропластиков, связанные с морфологией макрофитов, наблюдаются и у погруженных видов. Например, роголистник темно-зеленый (*Ceratophyllum demersum* L.) задерживает на 32–54 % больше полиэтиленовых микропластиков, чем рдесты (*Potamogeton* spp.), при проективном покрытии 50 % и на 12–32 % – при проективном покрытии 100 %. Объясняется это тем, что растения рдеста и его листья практически никогда не переплетаются, чего нельзя сказать о роголистнике, листья которого дихотомически разветвлены и образуют плотную сетчатую структуру. Кроме того, роголистник обычно произрастает в слабопроточных застойных зонах, слабый водообмен в которых также способствует задержанию пластиковых микропластиков. Близки по морфологии и условиям произрастания к роголистнику элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx.) и наяда малая (*Najas minor* All.). Растения же рдеста пронзеннолистного (*Potamogeton perfoliatus* L.) могут выдерживать значительные механические нагрузки, этот вид встречается на участках существенно воздействия ветровых и судовых волн.

Многие виды воздушно-водной растительности имеют массивные стебли и листья и сходную морфологию. Значительная часть микропластиков, природных и искусственных, у этих растений задерживается в местах влагилищно-пластиночного сочленения и узлах отхода листьев от стеблей. Не наблюдается выраженной

*Относительная величина задержания микропластиков тем или иным видом ВВР определялась как разница между средней величиной задержания микропластиков данным видом и аналогичной величиной для сравниваемого вида (группы видов), отнесенная к первой величине и выраженная в процентах.

связи между степенью шероховатости листьев и количеством микрочастиц, прикрепленных к растениям, поскольку у большинства видов листья гладкие или слабо шероховатые (тростник обыкновенный, манник большой). Вместе с тем осока острая, имеющая сильно шероховатые листья, при всех исследованных проективных покрытиях, как правило, демонстрирует примерно на 20 % большую эффективность задержания пластиковых микрочастиц. Для всех видов ВВР адгезия к листьям и стеблям чаще всего проявляется у микрочастиц из гибкого материала: микроволокон и микропленок. Изменение адгезивных свойств поверхностей макрофитов может произойти в результате развития фитоперифитонных водорослей, формирующих на ВВР биопленку с липкой поверхностью.

Для пластиковых микрочастиц из материалов типа пенополистирола и в меньшей мере материалов на основе полиэтилена характерно притягивание их к другим предметам в результате взаимодействия электрических полей. В лабораторных условиях автором было установлено, что расстояние, на котором начинает проявляться действие сил притяжения микрофрагментов к стеблям и листьям ВВР, зависит от внутренней структуры стеблей растений и размера частиц. При трубчатой и сильно пористой структуре стеблей силы притяжения проявляются слабее и действуют на более близком расстоянии. Уменьшение размеров частиц также приводит к уменьшению расстояния взаимодействия, при этом не всегда пропорционально по отношению к тем же видам растений. Так, уменьшение размера экспериментальных частиц пенополистирола с 3 до 1 мм привело к снижению уровня притяжения частиц растениями айра обыкновенного (*Acorus calamus* L.) до уровня тростника, хотя для более крупных частиц он находился на уровне манника и осоки. Диаметр стебля для растений одного и того же вида не оказывает существенного влияния на расстояние притягивания частиц растениями. При уменьшении диаметра стебля тростника с 8 до 4 мм расстояние начала притягивания уменьшилось с 1.5 до 1.4 см, т.е. всего на 1 мм.

Для широко распространенных видов воздушно-водной растительности расстояние, на котором начинается притягивание частиц пенополистирола, в исследованном размерном диапазоне колеблется в пределах 1.0–1.9 см. Сильнее всего частицы пенополистирола при-

тягивает осока, листья которой имеют ширину около 4 мм. Характерно, что в исследовании, проведенном нами ранее, именно осока была тем растением, которое удерживало наибольшее количество микрочастиц минерального и органического происхождения в расчете на единицу его воздушно-сухого веса (при абсолютно-сухом весе 2.5 г растение может сорбировать до 2.7 г мелкодисперсных твердых частиц) [Казмирук и др., 2004].

На расстояние, при котором начинается притягивание частиц пенополистирола, по-видимому, влияет внутреннее анатомическое строение стеблей. Более низкая степень притягивания микрочастиц растениями рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L.) и тростника обыкновенного может быть объяснена наличием у этих видов больших воздухоносных полостей (аэренхимы), которые у других исследованных видов значительно меньше.

При высокой концентрации пластиковых микрочастиц на поверхности воды в пределах зарослей ВВР порядка 1000 и более штук на 1 м² возможна агрегация свободноплавающих частиц с уже прикрепленными к растениям. Так, в наших экспериментах с растениями тростника при различных концентрациях микропленок со средним размером 4.5 мм и концентрации микрочастиц 6000 шт./м² происходило их слипание, запруживание узких мест между растениями, возникали цепочки прикрепившихся друг к другу микропленок. Это, в свою очередь, увеличивало степень задержания микрочастиц растениями, а график изменения степени задержания частиц тростником в зависимости от их концентрации приобретал S-образную форму (рис. 3). Такое явление наблюдалось при обоих исследованных проективных покрытиях ВВР. Степень задержания микропленок тростником при самой высокой из исследованных концентраций микрочастиц составляла 41 и 57 % при проективном покрытии 50 и 100 % соответственно.

Роль и интенсивность действия определенных механизмов в каждом конкретном случае зависит от видового состава ВВР, густоты произрастания, сезона года, условий развития, гидрологических и гидродинамических особенностей водного объекта, размеров и происхождения частиц. Плавающие на поверхности воды частицы в основном задерживаются надводными частями воздушно-водных растений, верхушками некоторых видов погруженных растений, доходящих до поверхности воды

(например, роголистника темно-зеленого), или плавающими на поверхности воды листьями и стеблями. Свободноплавающие растения, такие как сальвиния плавающая (*Salvinia natans* (L.) All.), пузырчатка обыкновенная (*Utricularia vulgaris* L.) или ряска трехдольная (*Lemna trisulca* L.), а также плавающий растительный опад из фрагментов отмершей ВВР и листовой опад из деревьев и кустарников могут создавать на поверхности воды плотные запруды, улавливающие практически все плавающие частицы. Жесткой основой таких запруд являются заросли воздушно-водной растительности. Подобные запруды часто формируются на устьевых участках малых водотоков, впадающих в водоемы, чему способствует общее снижение скоростей движения воды, а также в зарослях прибрежной воздушно-водной растительности под действием нагонных ветров. Весной на поверхности воды могут формироваться плавающие маты из прошлогоднего растительного опада, особенно тростника, а в зонах со слабым водообменом – сплавины, существующие многие годы и являющиеся очагами заболачивания акваторий.

Перехват твердого материала, переносимого потоком воды, происходит не только на ее поверхности, но и по всей водной толще и на дне. Частицы, фрагменты растений и предметы антропогенного происхождения, плотность которых близка к плотности воды, перемещаются по всей ее толще и, достигнув зарослей ВВР, задерживаются стеблями и листьями погруженной ВВР и подводными частями воз-

душно-водных растений. В толще воды также возможно формирование объемных запруд как из материала, перемещающегося под водой, так и из материала, накопившегося на ее поверхности и под давлением верхних слоев и формирующегося напора воды выдавливаемого вглубь водной толщи. Основным материалом таких запруд, которые могут достигать дна, являются крупные и мелкие древесные фрагменты, составляющие ее каркас и дополненные жесткими фрагментами воздушно-водных растений и листьями как ВВР, так и древесной растительности. Просветы и поры в этой структуре со временем забиваются находящимся в воде детритом. Пористая структура таких запруд и вдольбереговых образований из произрастающей воздушно-водной ВВР, неразложившегося растительного опада и детрита является эффективным естественным фильтром, препятствующим попаданию твердых частиц различной природы с водосбора в водоем.

Гидравлическое сопротивление у дна водных объектов всегда выше, чем сопротивление разных слоев жидкости. В зарастающих зонах это сопротивление усиливается прикорневыми частями растений, корнями, корневищами и турионами, а также созданными ими неровностями в поверхности грунтов дна. Кроме того, на дне прибрежной зоны часто скапливается растительный опад как автохтонного происхождения, так и привнесенный с водосбора. Все это, вместе с минимальными скоростями движения воды, создает значительные препятствия для частиц, перемещающихся в придонной области и перекатывающихся по поверхности дна.

Как уже было сказано, на поведение микрочастиц в водном объекте влияет не только структура состояния и свойства макрофитов, но и происхождение и размер микрочастиц. Будет ли частица плавать по поверхности воды, перемещаться в водной толще или опустится на дно – зависит от плотности исходного материала, ее массы и формы, а также характеристики водной среды: плотности, поверхностного натяжения, скорости движения, турбулентности и вязкости воды, зависящей от температуры. Если для наземных экосистем плотность микрочастиц не имеет существенного значения, то для частиц, попавших в водную среду, это пороговая характеристика, определяющая их плавучесть, способность к миграции и дальнейшую судьбу. Кроме того,

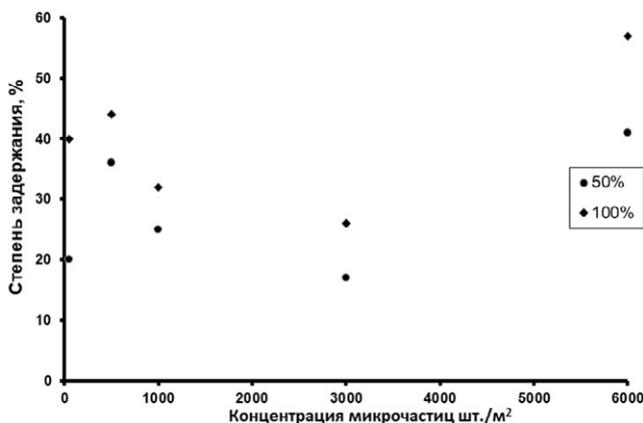


Рис. 3. Изменение степени задержания пластиковых микропленок со средним размером 4.5 мм тростником обыкновенным в зависимости от концентрации микропластинок в зарослях ВВР и проективного покрытия.

Fig. 3. Change in the retention rate of plastic microparticles (films) 4.5 mm in average size by common reed depending on the concentrations of microparticles in the thickets of higher aquatic plants and projective cover.

при длительном нахождении в природной среде изначальные физические характеристики синтетических полимерных материалов модифицируются под воздействием механического разрушения, биогеохимических процессов, фотохимической деградации, биологического обрастания и коагуляции.

Заключение

Макрофиты играют существенную барьерную роль при поступлении пластиковых микрочастиц с загрязненных территорий суши в водный объект. Их влияние проявляется как в прямом механическом задержании микрочастиц листьями и стеблями растений, так и через изменение скоростной структуры потока воды и гидродинамической активности водных масс, а также в результате средообразующей роли макрофитов и свойств самих микрочастиц. Впервые рассмотрены возможные механизмы задержания пластиковых микрочастиц макрофитами, различная природа этих механизмов и комплексный характер проявления, что позволяет объяснить, почему в зарослях ВВР в воде, в донных отложениях и на самих растениях обнаруживаются концентрации пластиковых микрочастиц на порядки выше,

чем на прилегающих акваториях. Полученные результаты могут быть использованы на практике для создания буферных зон из макрофитов для предотвращения и регулирования загрязнения водных объектов микропластиком и другими загрязнителями, особенно на урбанизированных территориях. Способность макрофитов притягивать некоторые виды микропластиков в результате взаимодействия электрических полей может быть использована для создания технических устройств и методов улавливания пластиковых микрочастиц в водной и воздушной среде, на поверхности грунта, а также при очистке сточных вод.

Наиболее перспективным и востребованным направлением дальнейших исследований взаимодействия пластиковых микрочастиц и ВВР является изучение в природных и лабораторных условиях барьерной роли природных и искусственно созданных буферных зон с макрофитами, с учетом многообразия их морфологических и экологических особенностей, а также многообразия микропластика, включая различные исходные полимерные материалы, диапазоны размеров, формы, степень выветривания и изменение физико-химических свойств микрочастиц.

Список литературы

1. Казмирук В.Д. 1990. Гидравлические сопротивления высшей водной растительности. *Водные ресурсы*, 1: 101–108.
2. Казмирук В.Д. 2020. *Микропластик в окружающей среде: Нарастающая проблема планетарного масштаба*. М.: URSS, 432 с.
3. Казмирук В.Д. 2021. Барьерная роль макрофитов при загрязнении водных объектов микропластиком. *Наука. Инновации. Технологии*, 3: 133–149.
4. Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н., Бреховских В.Ф. 2004. *Зарастающие водотоки и водоемы: Динамические процессы формирования донных отложений*. М.: Наука, 310 с.
5. Bai Z., Wang N., Wang M. 2021. Effects of microplastics on marine copepods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217: 112243. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112243>
6. Chen S., Sanfod L.P., Koch E.W., Shi F., North E.W. 2007. A nearshore model to investigate the effects of seagrass bed geometry on wave attenuation and suspended sediment transport. *Estuaries and Coasts*, 30(2): 296–310. <https://doi.org/10.1007/BF02700172>
7. Di M., Liu L., Wang W., Wang J. 2019. Manuscript prepared for submission to environmental toxicology and pharmacology pollution in drinking water source areas: Microplastics in the Danjiangkou Reservoir, China. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 65: 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.12.009>
8. Eitzen L., Paul S., Braun U., Altmann K., Jekel M., Ruhl A.S. 2019. The challenge in preparing particle suspensions for aquatic microplastic research. *Environmental Research*, 168: 490–495. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.008>
9. Esiukova E.E., Lobchuk O.I., Volodina A.A., Chubarenko I.P. 2021. Marine macrophytes retain microplastics. *Marine Pollution Bull.*, 171: 112738. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112738>
10. Goss H., Jaskiel J., Rotjan R. 2018. *Thalassia testudinum* as a potential vector for incorporating microplastics into benthic marine food webs. *Marine Pollution Bull.*, 135: 1085–1089. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.024>
11. Horvath T.G. 2004. Retention of particulate matter by macrophytes in a first-order stream. *Aquatic Botany*, 78(1): 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2003.09.003>

12. Jones K.L., Hartl M.G.J., Bell M.C., Capper A. **2020**. Microplastic accumulation in a *Zostera marina* L. bed at Deerness Sound, Orkney, Scotland. *Marine Pollution Bull.*, 152: 110883. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110883>
13. Kalčíková G. **2020**. Aquatic vascular plants – A forgotten piece of nature in microplastic research. *Environmental Pollution*, 262: 114354. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114354>
14. Kukkola A., Krause S., Lynch I., Sambrook Smith G.H., Nel H. **2021**. Nano and microplastic interactions with freshwater biota – Current knowledge, challenges and future solutions. *Environment International*, 152: 106504. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106504>
15. Luther M.E., Leonard L.A. **1995**. Flow hydrodynamics in tidal marsh canopies. *Limnology and Oceanography*, 40(8): 1474–1484. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.8.1474>
16. Quartet S., Kroo'n A., Augustinus P.G.E.F., Van Santen P., Tri N.H.J. **2007**. Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam. *Asian Earth Science*, 29(4): 576–584. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.05.008>
17. Santos C.B., de los, Krång A.-S., Infantes E. **2021**. Microplastic retention by marine vegetated canopies: Simulations with seagrass meadows in a hydraulic flume. *Environmental Pollution*, 269: 116050. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116050>
18. Sendra M., Sparaventi E., Novoa B., Figuera A. **2021**. An overview of the internalization and effects of microplastics and nanoplastics as pollutants of emerging concern in bivalves. *Science of the Total Environment*, 753: 142024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142024>
19. Stead J.L., Cundy A.B., Hudson M.D., Thompson Ch.E.L., Williams I.D., Russell A.E., Pabortsava K. **2020**. Identification of tidal trapping of microplastics in a temperate salt marsh system using sea surface microlayer sampling. *Scientific Reports*, 10: 14147. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70306-5>

References

- Kazmiruk V.D. **1990**. Hydraulic resistances of higher aquatic vegetation. *Vodnye resursy*, 17(1): 101–108. (In Russ.).
- Kazmiruk V.D. **2020**. *Mikroplastik v okruzhayushchey srede: Narastayushchaya problema planetarnogo masshtaba [Microplastics in the environment: the growing problem of a planetary scale]*. Moscow: URSS, 432 p. (In Russ.).
- Kazmiruk V.D. **2021**. The barrier role of macrophytes in pollution of water bodies with microplastics. *Science. Innovations. Technologies*, 3: 133–149. (In Russ.).
- Kazmiruk V.D., Kazmiruk T.N., Brekhovskikh V.F. **2004**. *Overgrown streams and reservoirs: Dynamic processes of formation of bottom sediments*. Moscow: Nauka Press, 310 p. (In Russ.).
- Bai Z., Wang N., Wang M. **2021**. Effects of microplastics on marine copepods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217: 112243. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112243>
- Chen S., Sanfod L.P., Koch E.W., Shi F., North E.W. **2007**. A nearshore model to investigate the effects of seagrass bed geometry on wave attenuation and suspended sediment transport. *Estuaries and Coasts*, 30(2): 296–310. <https://doi.org/10.1007/BF02700172>
- Di M., Liu L., Wang W., Wang J. **2019**. Manuscript prepared for submission to environmental toxicology and pharmacology pollution in drinking water source areas: Microplastics in the Danjiangkou Reservoir, China. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 65: 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.12.009>
- Eitzen L., Paul S., Braun U., Altmann K., Jekel M., Ruhl A.S. **2019**. The challenge in preparing particle suspensions for aquatic microplastic research. *Environmental Research*, 168: 490–495. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.008>
- Esiukova E.E., Lobchuk O.I., Volodina A.A., Chubarenko I.P. **2021**. Marine macrophytes retain microplastics. *Marine Pollution Bull.*, 171: 112738. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112738>
- Goss H., Jaskiel J., Rotjan R. **2018**. *Thalassia testudinum* as a potential vector for incorporating microplastics into benthic marine food webs. *Marine Pollution Bull.*, 135: 1085–1089. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.024>
- Horvath T.G. **2004**. Retention of particulate matter by macrophytes in a first-order stream. *Aquatic Botany*, 78(1): 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2003.09.003>
- Jones K.L., Hartl M.G.J., Bell M.C., Capper A. **2020**. Microplastic accumulation in a *Zostera marina* L. bed at Deerness Sound, Orkney, Scotland. *Marine Pollution Bull.*, 152: 110883. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110883>
- Kalčíková G. **2020**. Aquatic vascular plants – A forgotten piece of nature in microplastic research. *Environmental Pollution*, 262: 114354. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114354>
- Kukkola A., Krause S., Lynch I., Sambrook Smith G.H., Nel H. **2021**. Nano and microplastic interactions with freshwater biota – Current knowledge, challenges and future solutions. *Environment International*, 152: 106504. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106504>

15. Luther M.E., Leonard L.A. **1995**. Flow hydrodynamics in tidal marsh canopies. *Limnology and Oceanography*, 40(8): 1474–1484. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.8.1474>
16. Quartet S., Kroon A., Augustinus P.G.E.F., Van Santen P., Tri N.H.J. **2007**. Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam. *Asian Earth Science*, 29(4): 576–584. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.05.008>
17. Santos C.B., de los, Krång A.-S., Infantes E. **2021**. Microplastic retention by marine vegetated canopies: Simulations with seagrass meadows in a hydraulic flume. *Environmental Pollution*, 269: 116050. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116050>
18. Sendra M., Sparaventi E., Novoa B., Figuera A. **2021**. An overview of the internalization and effects of microplastics and nanoplastics as pollutants of emerging concern in bivalves. *Science of the Total Environment*, 753: 142024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142024>
19. Stead J.L., Cundy A.B., Hudson M.D., Thompson Ch.E.L., Williams I.D., Russell A.E., Pabortsava K. **2020**. Identification of tidal trapping of microplastics in a temperate salt marsh system using sea surface microlayer sampling. *Scientific Reports*, 10: 14147. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70306-5>

Сведения об авторе

КАЗМИРУК Василий Данилович (<https://orcid.org/0000-0001-5241-174X>), кандидат географических наук, старший научный сотрудник группы моделирования продукционно-деструкционных процессов, Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН), Москва, Researcher ID P-3332-2014, kazm@iwp.ru

About the Author

KAZMIRUK Vasily D. (<https://orcid.org/0000-0001-5241-174X>), Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher of the Group of production-destruction processes modelling, Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences (WPI RAS), Moscow, Researcher ID P-3332-2014, kazm@iwp.ru