



# БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ ПЛАСТИК

## И МОРСКОЙ МУСОР

ЗАБЛУЖДЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ВЛИЯНИЕ НА  
МИРОВОЙ ОКЕАН



© Программа ООН по окружающей среде (UNEP), 2015

Разрешается частичное и полное воспроизведение данной публикации в образовательных и некоммерческих целях без получения разрешения правообладателя с обязательной ссылкой на источник.

Публикация осуществляется в рамках Глобального партнерства по морскому мусору (GPML). UNEP благодарит правительство Норвегии за финансовую поддержку GPML и данной публикации.

Также мы выражаем благодарность редакторам публикации: *Хайди Савелли (DEPI, UNEP), Винсенту Суини (DEPI UNEP), Метт Л. Уилки (DEPI, UNEP), Кайсе Уусимаа (DEPI, UNEP), Мику Уилсону (DEWA, UNEP) Элисе Тонда (DTIE, UNEP), Аунхоа Карпинтеро (DTIE/IETS, UNEP), Марии Уестербос, Йеруну Давосу (Plastic Soup Foundation), Кристиану Бонтену (Штутгартский университет), Энтони Эндреди (Университет штата Северная Каролина, США)*

**Автор:** Доктор Питер Джон Кершоу (Dr. Peter John Kershaw)

**Дизайн:** Агнес Рубе (Agnes Rube)

**Фото на обложке:** © Бен Эпплгарт (Ben Applegarth) / Broken Wave Nebula (лицензия Creative Commons)  
© Форест и Ким Старр (Forest and Kim Starr) / Habitat with plastic debris, Hawaii (лицензия Creative Commons)

**ISBN: 978-92-807-3494-2**

**Номер работы: DEP/1908/NA**

Отдел по осуществлению природоохранной политики (DEPI)

**Название для цитирования:** UNEP (2015) Биоразлагаемый пластик и морской мусор. Заблуждения, проблемы и влияние на Мировой океан. Программа ООН по окружающей среде (UNEP), Найроби. / UNEP (2015) Biodegradable Plastics and Marine Litter. Misconceptions, concerns and impacts on marine environments. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi.

#### **Ограничение ответственности**

Определения, используемые в данной публикации, и подача материала в ней ни в коей мере не являются отражением позиции Программы ООН по окружающей среде касательно юридического статуса какой-либо страны, территории, города или области, работы их властей или разграничения их территорий. Мнение автора публикации может не совпадать с официальным политическим курсом Программы ООН по окружающей среде. Упоминание любых торговых марок, продуктов и производителей, технологических процессов, а также физических и химических свойств каких-либо веществ (в т.ч. полимеров), ни в коей мере не должно рассматриваться как поддержка или критика торговых марок, продуктов, производителей, технологических процессов или свойств веществ автором публикации или UNEP.

# БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ ПЛАСТИК

## И МОРСКОЙ МУСОР

ЗАБЛУЖДЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ВЛИЯНИЕ НА  
МИРОВОЙ ОКЕАН

### Издатель отчета:

Глобальная программа действий по защите морской среды от загрязнения в результате осуществляемой на суше деятельности (GPA)



### UNEP GPA

Глобальная программа действий по защите морской среды от загрязнения в результате осуществляемой на суше деятельности (GPA), Секция по морским экосистемам, Отдел по осуществлению природоохранной политики (DEPI) п/я 30552 (00100), Найроби, Кения

**E-mail:** [gpm1@unep.org](mailto:gpm1@unep.org)

**Веб-сайт:** [unep.org/gpa/gpm1](http://unep.org/gpa/gpm1)





# Содержание

<b>Список сокращений</b>	<b>2</b>
<b>Краткое содержание</b>	<b>3</b>
<b>1. Введение</b>	<b>5</b>
<b>2. Полимеры и пластик: терминология и определения</b>	<b>9</b>
2.1 Обоснование необходимости четко сформулированных определений	9
2.2 Натуральные (био)полимеры	10
2.3 Синтетические полимеры и пластик	12
2.4 Биоосновный пластик	16
2.5 Биопластик	16
<b>3. Фрагментация, разложение и биоразложение</b>	<b>19</b>
3.1 Процесс разложения	19
3.2 Биологически неразлагаемый пластик	21
3.3 «Биоразлагаемый» пластик	21
3.4 Оксоразлагаемый пластик	22
<b>4. Поведение «биоразлагаемого» пластика в морской среде</b>	<b>25</b>
4.1 Состав пластикового мусора в океане	25
4.2 Судьба биоразлагаемого пластика в океане	25
<b>5. Общественное мнение и закономерности поведения</b>	<b>29</b>
<b>6. Выводы</b>	<b>31</b>
<b>Литература</b>	<b>32</b>

# Список сокращений

<b>ABS</b>	Акрилонитрилбутадиенстирол
<b>AC</b>	Акрил
<b>AcC (CTA, TAC)</b>	Ацетилцеллюлоза, триацетат целлюлозы
<b>AKD</b>	Алкид
<b>ASA</b>	Акрилонитрилстиролакрилат
<b>DECP</b>	Разлагаемые токопроводящие полимеры
<b>EP</b>	Эпоксидная смола (термоотверждаемая)
<b>PA</b>	Полиамид-4, -6, -11, -66
<b>PAN</b>	Полиакрилонитрил
<b>PBAT</b>	Поли(бутиленадипинат+терефталат)
<b>PBS</b>	Поли(бутиленсукцинат)
<b>PCL</b>	Поликапролактон
<b>PE</b>	Полиэтилен (ПЭ)
<b>PE-LD</b>	Полиэтилен низкой плотности
<b>PE-LLD</b>	Линейный полиэтилен низкой плотности
<b>PE-HD</b>	Полиэтилен высокой плотности
<b>PES</b>	Поли(этиленсукцинат)
<b>PET</b>	Полиэтилен терефталат (ПЭТ)
<b>PGA</b>	Полигликолевая кислота
<b>PHB</b>	Поли(гидроксibuтират)
<b>PLA</b>	Полилактид
<b>PMA</b>	Полиметилакрилат
<b>PMMA</b>	Поли(метил) метакрилат
<b>POM</b>	Полиоксиметилен
<b>PP</b>	Полипропилен (ПП)
<b>PS</b>	Полистирол (ПС)
<b>EPS (PSE)</b>	Пенополистирол
<b>PU (PUR)</b>	Полиуретан (ПУ)
<b>PVA</b>	Поливиниловый спирт
<b>PVC</b>	Поливинилхлорид (ПВХ)
<b>SAN</b>	Стиролакрилонитрил
<b>SBR</b>	Бутадиен-стирольный каучук
<b>Starch</b>	Крахмал

1.002 millimeters

0.000000 millimeters

1.0542 millimeters

0.000000 millimeters

2

БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ  
ПЛАСТИК И  
МОРСКОЙ МУСОР

ЗАБЛУЖДЕНИЯ,  
ПРОБЛЕМЫ И ВЛИЯНИЕ  
НА МИРОВОЙ ОКЕАН

0.002 millimeters

# Краткое содержание

- Разработка и использование синтетических полимеров и пластика приносит ощутимую пользу обществу. Одним из важнейших свойств таких материалов является их прочность. Но именно прочность, в сочетании с преднамеренным и непреднамеренным сбросом отходов в океан, а также несовершенством системы обработки отходов, приводит к повсеместному загрязнению океана пластиком. Большинство широко используемых видов пластика обладают большой устойчивостью к биологическому разложению. Количество пластика в океане растет, а вместе с ним растет и риск значительного физического и химического влияния на Мировой океан. Природа риска зависит от размера и физических свойств объектов, химического состава полимера и времени, необходимого для его биологического разложения (GESAMP 2015).
- Синтетические полимеры могут производиться из ископаемого топлива или специально выращиваемой для этих целей биомассы. Из обоих видов сырья можно производить пластик, как разлагаемый, так и не разлагаемый биологически. Многие виды пластика подвержены эрозии под воздействием атмосферных условий и фрагментации под воздействием УФ-излучения. Внесение специальных добавок при производстве пластика позволяет замедлить эти процессы. Полным биологическим разложением пластика считается момент, когда не остается никаких следов исходного полимера, т.е. когда он в присутствии микроорганизмов полностью разлагается на диоксид углерода, метан и воду. Скорость протекания процесса зависит от температуры. Для полного разложения некоторых видов пластика, маркированных как «биоразлагаемые», требуются особые условия (например, поддержание температуры свыше 50° С в течение длительного времени), достижимые только в промышленных компостирующих установках. В естественной морской среде такие условия возникают крайне редко, если возникают вообще.
- В некоторые виды не разлагаемых биологически полимеров – например, полиэтилен – при производстве добавляется присадка на металлической основе, ускоряющая их фрагментацию. Такой пластик называют оксоразлагаемым. Использование такой технологии повышает количество микропластика в Мировом океане; однако на данный момент нет независимых научных данных, которые подтверждали бы, что такие материалы разлагаются быстрее, чем немодифицированный полиэтилен. Разложение других специализированных полимеров ускоряется в морской воде. Они могут быть полезны, например, для сокращения вреда от потерянных и выброшенных рыболовных снастей. Однако использование таких полимеров может снизить эксплуатационные характеристики производимых изделий. В дополнение к этому стоимость их производства гораздо выше, и переход на модифицированный пластик может потребовать серьезных финансовых вложений.
- Еще одним недостатком повсеместного внедрения «биоразлагаемых» видов пластика является необходимость отделять их от обычного пластика, иначе качество получаемого при переработке продукта существенно снизится. Также существуют некоторые, пусть и ограниченные, доказательства того, что использование на продуктах маркировки «биоразлагаемый» с большей вероятностью приведет к тому, что конечный потребитель их выбросит, а не сдаст в переработку надлежащим образом (GESAMP 2015).
- Вывод: основываясь на имеющихся научных доказательствах, можно с большой долей уверенности утверждать, что внедрение изделий из пластика, маркированных как «биоразлагаемые», не приведет к заметному сокращению количества пластика в морской среде или снижению физического и химического влияния на нее.

1.0542 millimeters

0.002 millimeters

3

**БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ  
ПЛАСТИК И  
МОРСКОЙ МУСОР**

ЗАБЛУЖДЕНИЯ,  
ПРОБЛЕМЫ И ВЛИЯНИЕ  
НА МИРОВОЙ ОКЕАН

# 1

## ВВЕДЕНИЕ

---



ФОТО: © АМАНДА УИЧЕРЛИ (AMANDA WICHERLEY) / CREATIVE COMMONS

# 4

**БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ  
ПЛАСТИК**

ПОМОЖЕТ ЛИ  
«БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ»  
ПЛАСТИК СУЩЕСТВЕННО  
СОКРАТИТЬ КОЛИЧЕСТВО  
МОРСКОГО МУСОРА?



# ВВЕДЕНИЕ

Задача данной брошюры — кратко описать некоторые ключевые проблемы, связанные с попаданием биоразлагаемого пластика в океаны, и помочь понять, способно ли его использование сократить влияние пластика на морскую среду в целом.

Одним из наиболее ценных свойств многих видов пластика является прочность. Это позволяет во многих случаях заменять пластиком камень, металл, бетон и древесину. Зачастую пластик лучше, чем другие материалы, подходит для хранения пищи, медицинских препаратов, обеспечения электро- и термоизоляции. Его использование позволяет снизить потребление топлива автомобилями и самолетами. К сожалению, недостатки системы сбора и переработки использованного пластика делают его прочность серьезной проблемой для окружающей среды.

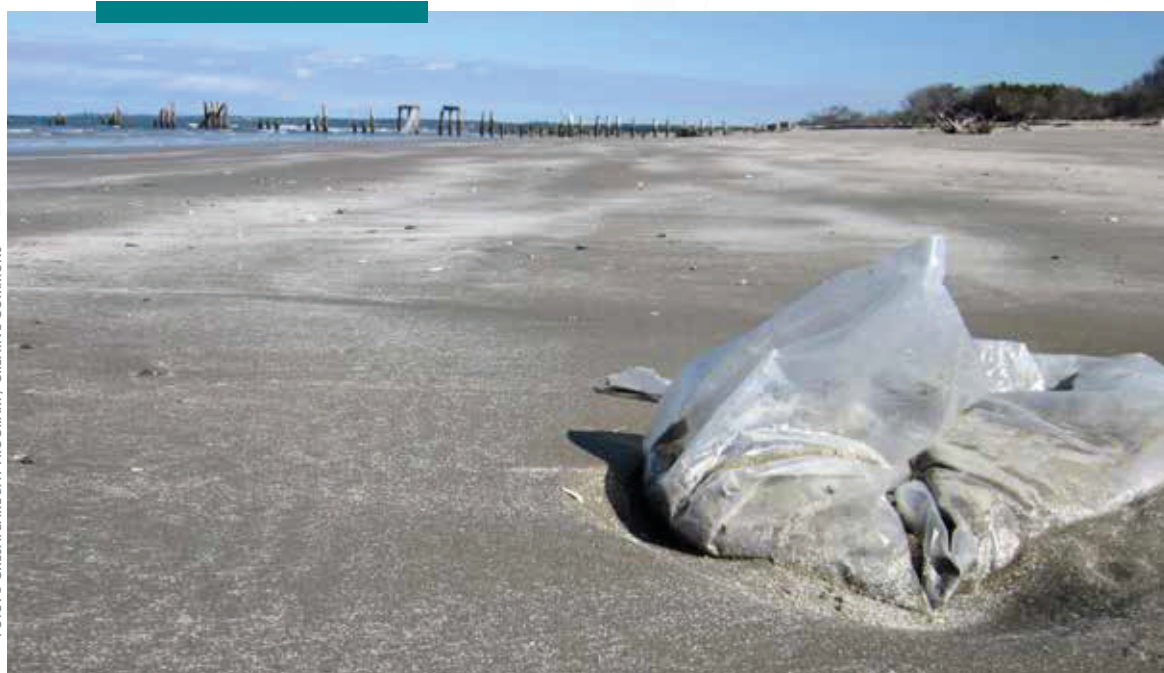
Пластик встречается в океане повсеместно, что стало результатом нескольких десятилетий неправильного обращения с отходами. Человечество недооценивало потенциал выбрасываемого пластика, некорректно использовало рыночные инструменты и не беспокоилось о последствиях замусоривания (GESAMP 2015).

Основными причинами появления пластика в океане являются:

- недостатки системы обращения с отходами в государственном и частном секторе;
- нарушение законодательства;
- выброс мусора отдельными лицами и группами;
- случайное попадание мусора в океан из хозяйственных объектов на суше и на воде, включая последствия геологических и метеорологических инцидентов;
- недостаточная информированность потребителей — например, об использовании микропластика в средствах личной гигиены или попадания волокон ткани в сточные воды при стирке.

Пластик встречается в океане повсеместно, что стало результатом нескольких десятилетий неправильного обращения с отходами. Человечество недооценивало потенциал выбрасываемого пластика.

В попытках улучшить систему обращения с отходами и повлиять на отношение к этому вопросу общества в целом отдельные активисты и группы сталкиваются со множеством трудностей (GESAMP 2015).



0.004 millimeters

0.002 millimeters

1.054

ФОТО: © CHESAPEAKE BAY PROGRAM / CREATIVE COMMONS

5

**БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ  
ПЛАСТИК И  
МОРСКОЙ МУСОР**

ЗАБЛУЖДЕНИЯ,  
ПРОБЛЕМЫ И ВЛИЯНИЕ  
НА МИРОВОЙ ОКЕАН

То, в какой степени «биоразлагаемый» пластик действительно разлагается в естественной среде, стало предметом постоянных дискуссий.

Предполагалось, что использование «биоразлагаемых» видов пластика может сыграть важную роль в снижении загрязненности океана. Биологическим разложением в естественной среде называется полный или частичный распад полимера на углекислый газ, воду и биомассу в результате гидролиза, разложения под действием света и деятельности микроорганизмов (выделения ферментов и внутриклеточных процессов). Более подробно данный процесс описан в разделе 3. Такое свойство материала может показаться привлекательным и полезным; однако, прежде чем широко внедрять «биоразлагаемые» виды пластика в оборот, критически необходимо оценить их возможное влияние на морскую среду.

Материал может маркироваться как «биоразлагаемый» в случае, если он соответствует определенным государственным или региональным стандартам, применяемым к промышленным компостирующим установкам (раздел 3.1). Такие стандарты не имеют ничего общего с разложением в бытовых компостных ямах или морской среде. Не менее важно время, требуемое для биологическо-

го разложения, которое зависит от природных факторов и свойств полимера. Влияние пластиковых отходов на окружающую среду пропорционально времени, необходимому для полного разложения полимера. Необходимо учитывать потенциальное влияние отходов на каждой стадии разложения, будь то попадание в окружающую среду пластикового объекта целиком или присутствие в воде микрочастиц полимера.

То, в какой степени «биоразлагаемый» пластик действительно разлагается в естественной среде, стало предметом постоянных дискуссий. Дискуссии распространились и на научную среду, но наиболее остро они проходят между организациями, которые могут быть материально заинтересованы в их исходе — производителями различных видов пластика, химических добавок, ускоряющих процесс разложения, а также компаниями, участвующими в сборе и переработке отходов.

Определить, какие материалы оказывают меньше вредного воздействия на окружающую среду, не так просто. Фундаментом для принятия решений об оптимальном использовании ресурсов и влиянии различных процессов, материалов и продуктов на окружающую среду, может служить метод оценки жизненного цикла (Lifecycle Assessment, LCA). Например, LCA можно использовать для оценки целесообразности использования сумок и тканей на основе полимеров или натуральных волокон, а также обычных или биоразлагаемых видов пластика. В одном из исследований, основанных на LCA, влияние обычных полиэтиленовых пакетов (HDPE) на окружающую среду было признано наименьшим по сравнению с пакетами и сумками, произведенными из бумаги, LDPE, нетканого полипропилена (PP) и хлопковой ткани, но только в части «углеродного следа» (от меньшего к большему (от бумаги до хлопка) по вкладу в глобальное потепление; Томас и соавт., 2010). В исследовании не учитывались социальные факторы и влияние пластикового мусора на окружающую среду.

Напротив, анализ текстильных материалов, учитывающий их влияние на здоровье человека, окружающую среду и устойчивое развитие, показал, что использование хлопковых тканей более безопасно, чем акриловых (Мута и соавт., 2012). Однако важно разобраться, что следует понимать под таким широким термином, как «влияние на окружающую среду». Еще одно исследование текстильных материалов, также выполненное на базе метода LCA, показало, что негативное влияние хлопковых тканей на окружающую среду выше, чем тканей из PP или PET, и значительно выше, чем тканей из искусственных целлюлозных волокон (Шен и соавт., 2010). Это исследование учитывало токсичность для окружающей среды, загрязнение водоемов водорослями (эвтрофикацию), использование земельных и водных ресурсов. Ни одно из LCA-исследований не учитывало потенциальное влия-

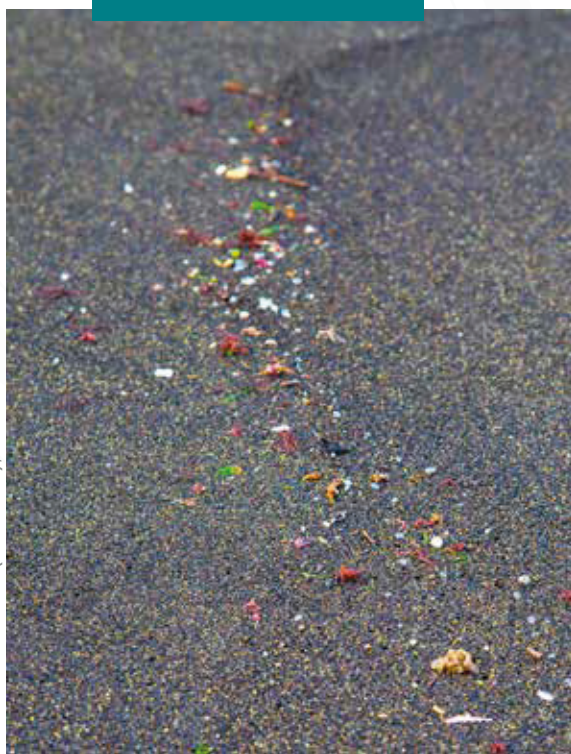


ФОТО: © ПИТЕР ЧАРАБ / RACE FOR WATER

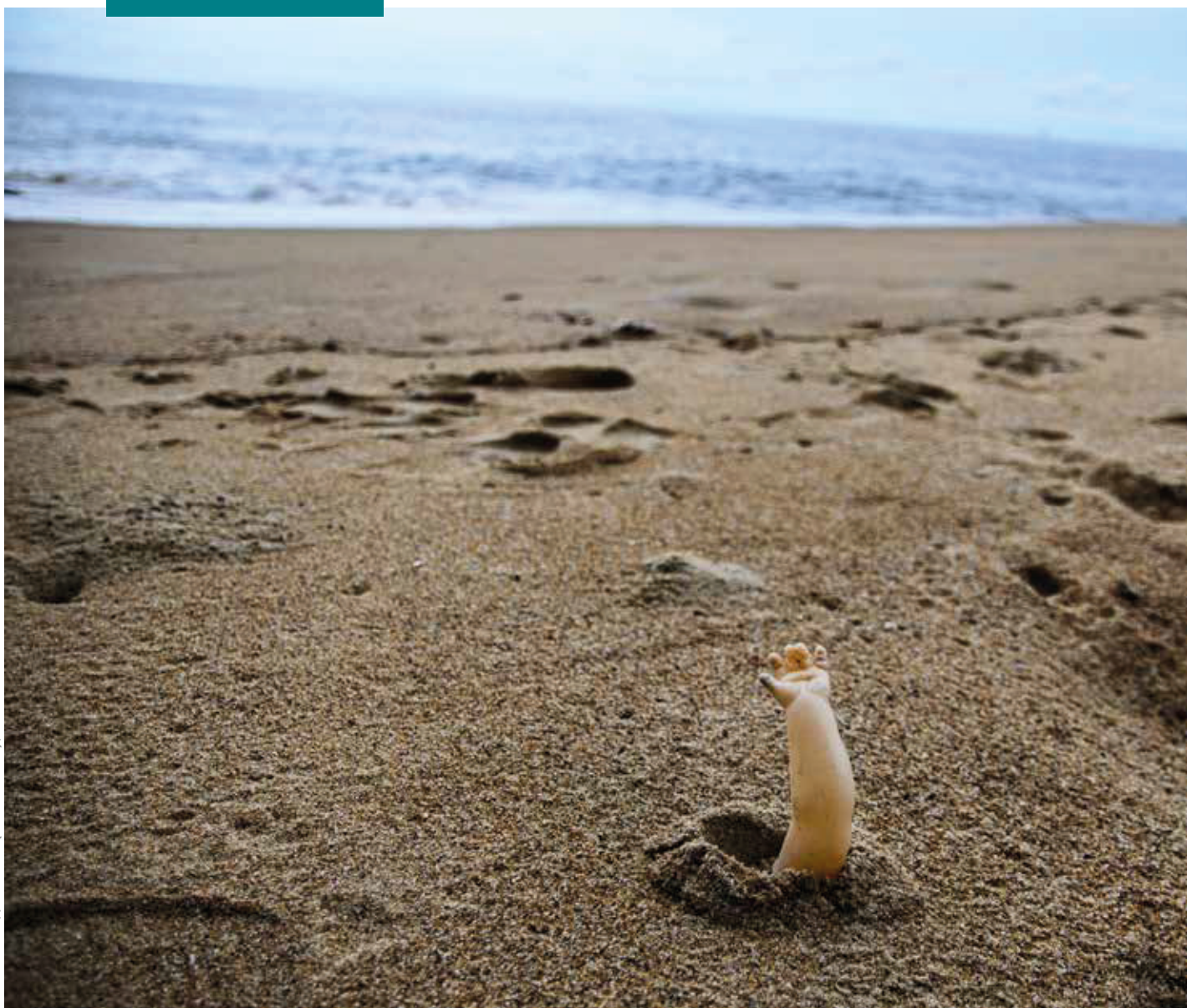
6

**БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ  
ПЛАСТИК И  
МОРСКОЙ МУСОР**

ЗАБЛУЖДЕНИЯ,  
ПРОБЛЕМЫ И ВЛИЯНИЕ  
НА МИРОВОЙ ОКЕАН

0.002 millimeters





1.0542 millimeters

ние на окружающую среду вследствие замусоривания текстильными продуктами и тканями. Ясно, что результаты LCA-исследований определяются учитываемыми факторами. В комплексном LCA-исследовании необходимо учитывать экологические и социальные перспективы, а также временные масштабы. Без проведения таких комплексных оценок решения, принятые из благих побуждений, могут повлечь за собой принятие неэффективных мер, ненужные или непропорциональные расходы или непредвиденные негативные последствия.

При проведении любых исследований крайне важно учитывать все факторы, допущения, ограничения, интересы сторон, качество данных и возможные неточности, прежде чем делать какие-либо выводы о ценности и применимости результатов исследования.

Влияние пластиковых отходов на окружающую среду пропорционально времени, необходимому для полного разложения полимера.

0.002 millimeters

## 2

### Полимеры и пластик: терминология и определения



ФОТО: ЖЕРЕН РОУЛЕНА (GERANT ROWLAND) / CREATIVE COMMONS

8

БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ  
ПЛАСТИК

ПОМОЖЕТ ЛИ  
«БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ»  
ПЛАСТИК СУЩЕСТВЕННО  
СОКРАТИТЬ КОЛИЧЕСТВО  
МОРСКОГО МУСОРА?



# ПОЛИМЕРЫ И ПЛАСТИК: ТЕРМИНОЛОГИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Термин «пластик» (также «пластмасса») обычно употребляется в отношении группы синтетических полимеров (см. раздел 2.3). Полимеры — это крупные органические молекулы, которые состоят из повторяющихся углеродных молекул или цепей, встречаются в природе и могут быть синтезированы. Различные типы полимеров обладают различными свойствами, которые в свою очередь влияют на их поведение в окружающей среде.

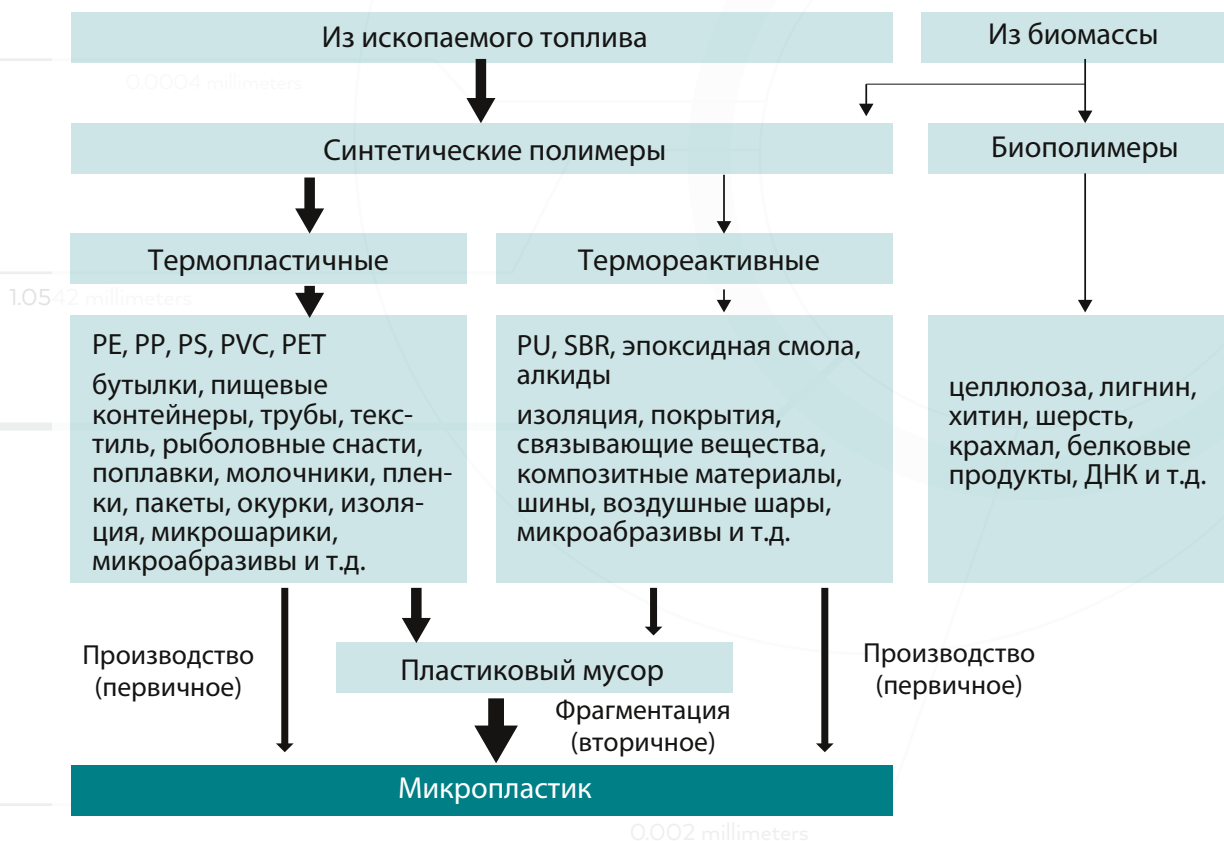
Некоторые виды пластика, производимого из ископаемого топлива, являются биоразлагаемыми; напротив, некоторые виды пластика, производимого из биомассы, не разлагаются биологически.

## 2.1 Обоснование необходимости четко сформулированных определений

Терминология, связанная с пластиком и его поведением в окружающей среде, разнообразна и сложна. В разделе 2 представлены некоторые определения терминов, используемых в данном отчете.

Оценить влияние пластика на окружающую среду и донести результаты такой оценки до широкой аудитории — непростая задача. Наука сложна и разнообразна. Одни виды синтетических полимеров изготавливаются из биомассы, другие — из ископаемого топлива. Некоторые полимеры могут изготавливаться из обоих видов сырья (рис. 2.1). Существуют полимеры, полученные из ископаемого топлива и биологически разлагаемые. Напротив, некоторые полимеры, изготовленные из биомассы (например, кукурузы) могут не быть биоразлагаемыми.

**Рис. 2.1** Связи между видами первичного сырья, синтетическими и натуральными полимерами, термопластичными и терморезистивными видами пластика. Области применения. Источник: GESAMP, 2015



Поведение вещества в окружающей среде зависит не только от его состава, но и от условий среды, которые могут сильно отличаться в разных частях океана. Иногда определения терминов недостаточны ясны, и это может привести к путанице и непониманию (таблица 2.1). Условия, которые требуются «биоразлагаемым» полимерам для полного разложения, могут сильно отличаться. Например, для полного разложения одноразового пластикового пакета с маркировкой «биоразлагаемый» на составляющие (воду, углекислый газ и метан) в разумные сроки на самом деле могут потребоваться условия, достижимые только в промышленных компостерах, — к примеру, температура 50° С. Важно, чтобы потребители принимали обоснованные решения; поэтому общество должно иметь доступ к надежной, достоверной и понятной информации о том, что на самом деле означают такие термины, как «разлагаемый» или «биоразлагаемый», а также какие оговорки могут применяться к ним.

**Таблица 2.1** Некоторые общие определения, относящиеся к биоразложению полимеров

ТЕРМИН	ОПРЕДЕЛЕНИЕ
<b>Разложение</b>	Частичный или полный распад полимера под воздействием УФ-излучения, окисления, деятельности микроорганизмов или других факторов. В понятие «распад» включается изменение свойств — выцветание, разрушение поверхности, фрагментация.
<b>Биоразложение</b>	Биологический процесс частичного или полного преобразования органической материи в воду, CO <sub>2</sub> /метан, энергию и новую биомассу под воздействием микроорганизмов (бактерий и грибов).
<b>Минерализация</b>	В контексте разложения полимеров — полный распад полимера на CO <sub>2</sub> , воду, метан, водород, аммиак и другие простые неорганические соединения в результате совместного небиологического и микробиологического воздействия.
<b>Биоразлагаемый</b>	Обладающий способностью к биоразложению.
<b>Компостируемый</b>	Обладающий способностью к биоразложению в почве при повышенной температуре, определенных условиях и за определенные промежутки времени. Обычно такие условия достижимы только в промышленных компостирующих установках (применяются соответствующие стандарты).
<b>Оксоразлагаемый</b>	Содержащий катализатор окисления (прооксидант), ускоряющий разложение при благоприятных условиях. Полная разлагаемость и биоразлагаемость таких полимеров на данный момент не доказаны.

Также к природным полимерам относятся полиамиды, встречающиеся в белках и формирующие структуру таких материалов, как шерсть и шелк. Примеры природных полимеров и сфер их использования приведены в таблице 2.2.

Условия, которые требуются «биоразлагаемым» полимерам для полного разложения, могут сильно различаться.

## 2.2 Натуральные (био)полимеры

Биополимеры — это очень крупные молекулы в виде цепочки с высокой молекулярной массой, производимые живыми организмами. Они часто встречаются в природе и формируют «строительный материал» для тканей растений и животных. Целлюлоза (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub> — это полисахарид (углеводородная цепочка), который считается самым распространенным природным полимером на земле. Является ключевой составляющей клеточной оболочки наземных растений. Хитин (C<sub>8</sub>H<sub>13</sub>O<sub>5</sub>N)<sub>n</sub> — полимер производного глюкозы (N-ацетилглюкозамин), формирующий экзоскелеты насекомых и ракообразных. Лигнин (C<sub>31</sub>H<sub>34</sub>O<sub>11</sub>)<sub>n</sub> — это сложный полимер из ароматических спиртов. Еще один важный компонент клеточной оболочки растений, который обеспечивает ее прочность и ограничивает проникновение воды в клетку. Кутин — природный полимер, разновидность воска, который покрывает поверхность растений.



Для разложения одноразового пластикового пакета с маркировкой «биоразлагаемый» могут потребоваться условия, достижимые только в промышленных компостерах.

**Таблица 2.2** Примеры природных полимеров и сфер их применения.

ПОЛИМЕР	ГДЕ ВСТРЕЧАЕТСЯ В ПРИРОДЕ	СФЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
<b>Хитин</b>	Экзоскелет ракообразных (крабы, раки, креветки) Экзоскелет насекомых Клеточные стенки грибов	Медицина, биомедицина (решетчатые структуры для выращивания тканей) Сельское хозяйство
<b>Лигнин</b>	Клеточные стенки растений	(Лигноцеллюлоза) Древесина для строительства Древесина в качестве топлива Газетная бумага В промышленности — в качестве диспергирующего агента, добавки или сырья
<b>Целлюлоза</b>	Клеточные стенки растений, в т.ч. большинства водорослей Выделяется некоторыми бактериями	Бумага Целлофан, вискозное волокно Топливо — переработка в целлюлозный этанол
<b>Полиэстер</b>	Кутин в кожице растений	
<b>Белковое волокно (например, фиброин, кератин)</b>	Шерсть, шелк	Одежда

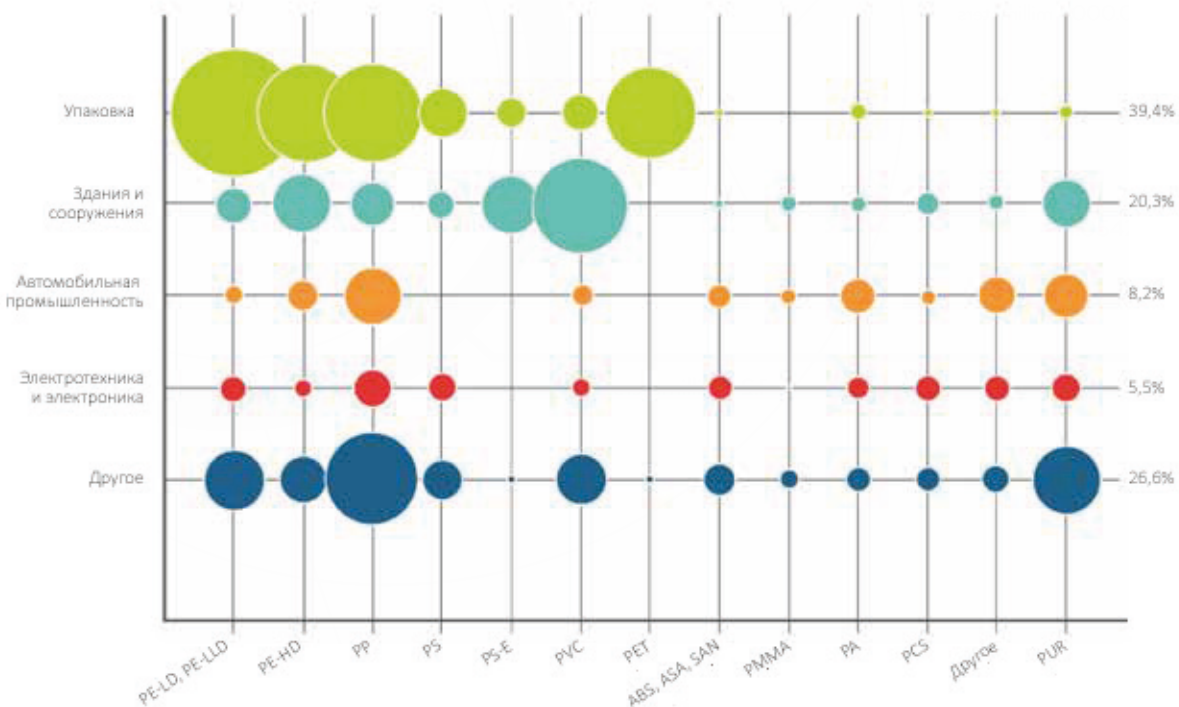
## 2.3 Синтетические полимеры и пластик

Существует два основных класса синтетических полимеров: термопластичные и терморезистивные (рис. 2.1). Само по себе слово «пластик» является сокращением английского «thermoplastic» (термопластичный). Пластичностью в инженерном деле, материаловедении и геологии называется способность материала изменять форму без разрушения. Термопластичные полимеры можно многократно формовать (пластически деформировать) при нагревании. Терморезистивный «пластик» невозможно повторно расплавить после формования. Самыми распространенными примерами таких полимеров являются эпоксидные смолы и покрытия. В большинство видов пластика добавляются дополнительные составляющие, которые изменяют свойства базового материала — например, пластификаторы, красители, защита от УФ-излучения, антиоксиданты, огнестойкие материалы. Наиболее распространенным видом терморезистивных полимеров являются эпоксидные смолы. Синтетические полимеры обычно производятся из углеводородного сырья, но в последнее время для их изготов-

ления все чаще используется биомасса (например, кукуруза или растительные масла). Свойства одного и того же полимера, произведенного из различных видов сырья, не различаются.

По объемам производства на рынке лидирует ограниченное количество синтетических полимеров с хорошо отлаженной технологией производства (рис. 2.2). Однако существует множество разных видов полимеров, производимых для узкоспециализированного использования. Их физические и химические свойства очень разнообразны (таблица 2.3). В дополнение к этому многие виды пластика являются сополимерами, т.е. сочетаниями совместно синтезируемых полимеров с определенными свойствами. В состав производимых изделий может входить сразу несколько видов полимеров или сополимеров. В результате мы получаем огромное количество разных видов материалов, в которых непосвященный человек может легко запутаться. И хотя характеристики и поведение этих материалов применительно к сферам использования (изоляционные плиты, пакеты, рыболовная леска и т.п.) достаточно хорошо изучены, нельзя сказать то же самое об их поведении в морской среде.

**Рис. 2.2** Спрос на пластик в Европе (27 стран-членов ЕС, Норвегия и Швейцария) по типам материала и сектору промышленности на 2012 год. Полиамид (в основном полиамид-6 и 6.6), используемый для производства рыболовных снастей, а также полистироловые и полиуретановые пены, применяемые для изоляции судов и производства поплавков, очень часто встречаются в виде мусора в морской среде. Изображение предоставлено PlasticsEurope (PEMRG)/Consulfic/ECEBD





**Таблица 2.3** Основные виды синтетических полимеров: сырье для производства, сферы использования и способность к разложению

АББРЕВИАТУРА	ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ	ОСНОВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА	ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	СПОСОБНОСТЬ К БИОРАЗЛОЖЕНИЮ НА СУШЕ (ВКЛЮЧАЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В МЕДИЦИНЕ)	СПОСОБНОСТЬ К БИОРАЗЛОЖЕНИЮ В ВОДНОЙ/МОРСКОЙ СРЕДЕ	ИСТОЧНИК
<b>ABS</b>	(акрилонитрилбутадиенстирол) Сополимер	Углеводороды	Трубы, защитные головные уборы, потребительские товары, детали конструктора Lego™			
<b>AC</b>	Акрил	Углеводороды	Оргстекло (см. также PMMA)			
<b>AcC (СТА, ТАС)</b>	Ацетилцеллюлоза, триацетат целлюлозы	Биомасса	Волокна, основа для фотопленки	Способность к биоразложению зависит от степени ацетилирования <sup>1</sup>		<sup>1</sup> Токива и соавт. 2009
<b>AKD</b>	Алкид	Частично биомасса	Покрытия, формы для литья			
	Целлофан	Биомасса (целлюлоза)	Упаковочная пленка			
<b>DECP</b>	Разлагаемые токопроводящие полимеры	Биомасса и углеводороды	Биодатчики, культивирование тканей	Разлагается в живых тканях <sup>2</sup>		<sup>2</sup> Гуо и соавт., 2013
<b>EP</b>	Эпоксидная смола (термоактивная)	Углеводороды	Связующие вещества, покрытия, изоляция			
<b>PA</b>	Полиамид, напр. нейлон-4, 6, 11, 66; кевлар	Углеводороды	Волокна, рыболовная леска, рыболовные сети			
<b>PAN</b>	Полиакрилонитрил	Углеводороды	Волокна, мембраны, паруса; прекурсор в производстве углеродного волокна			
<b>PBAT</b>	Поли(бутиленадипинат+терефталат)	Углеводороды	Пленки	Биоразлагаемый <sup>7</sup>		<sup>7</sup> Вэн и соавт., 2013

АББРЕВИАТУРА	ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ	ОСНОВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА	ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	СПОСОБНОСТЬ К БИОРАЗЛОЖЕНИЮ НА СУШЕ (ВКЛЮЧАЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В МЕДИЦИНЕ)	СПОСОБНОСТЬ К БИОРАЗЛОЖЕНИЮ В ВОДНОЙ/МОРСКОЙ СРЕДЕ	ИСТОЧНИК
<b>PBS</b>	Поли(бутилен сукцинат)	Углеводороды	Сельскохозяйственные мульчирующие пленки, упаковка	Биоразлагаемый <sup>1</sup>	Частично разлагается через 1 год, сохраняя при этом 95% прочности на разрыв <sup>3</sup> Частично разлагается через 2 года <sup>4</sup>	<sup>1</sup> Токива и соавт., 2009 <sup>3</sup> Секигучи и соавт., 2011 <sup>4</sup> Ким и соавт., 2014, а,б
<b>PCL</b>	Поликапролактон	Углеводороды	3D-печать, модели, биомедицина	Биоразлагаем посредством гидролиза в тканях человеческого тела Биоразлагаемый <sup>1</sup>	Частично разлагается через 1 год <sup>3</sup>	<sup>1</sup> Токива и соавт., 2009 <sup>3</sup> Секигучи и соавт., 2011
<b>PE</b>	Полиэтилен	Биомасса и углеводороды	Упаковка, контейнеры, трубы	Практически не разлагается; потенциальное незначительное разложение в тропическом климате за счет воздействия высоких температур, кислорода в воде и микрофлоры/микрофауны <sup>5</sup>		<sup>5</sup> Судкар и соавт., 2007
<b>PES</b>	Поли(этилсукцинат)	Углеводороды	Пленки	Биоразлагаемый <sup>1</sup>		<sup>1</sup> Токива и соавт., 2009
<b>PET</b>	Полиэтилентерефталат	Углеводороды, углеводороды и биомасса	Контейнеры, бутылки, флисовая одежда			
<b>PGA</b>	Поли(гликолевая кислота)		Хирургическая нить, пищевая упаковка	Биоразлагаем посредством гидролиза в тканях человеческого тела		
<b>PHB</b>	Поли(гидроксibuтират)	Биомасса	Хирургическая нить	Биоразлагаемый <sup>1</sup> Частично разлагается через 1 год <sup>3</sup>		<sup>1</sup> Токива и соавт., 2009 <sup>3</sup> Секигучи и соавт., 2011
<b>PLA</b>	Полилактид	Биомасса	Сельскохозяйственные мульчирующие пленки, упаковка, биомедицина, гигиенические принадлежности, 3D-печать	Биоразлагаемый <sup>1</sup> Компостируемый <sup>5</sup>		<sup>1</sup> Токива и соавт., 2009 <sup>5</sup> Пемба и соавт., 2014

1.002

1.0542 millimeters

14

**БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ ПЛАСТИК И МОРСКОЙ МУСОР**

ЗАБЛУЖДЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ВЛИЯНИЕ НА МИРОВОЙ ОКЕАН

0.002 millimeters

АББРЕВИАТУРА	ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ	ОСНОВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА	ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	СПОСОБНОСТЬ К БИОРАЗЛОЖЕНИЮ НА СУШЕ (ВКЛЮЧАЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В МЕДИЦИНЕ)	СПОСОБНОСТЬ К БИОРАЗЛОЖЕНИЮ В ВОДНОЙ/МОРСКОЙ СРЕДЕ	ИСТОЧНИК
<b>PMMA</b>	Поли(метил) метакрилат	Углеводороды	Оргстекло, биомедицина, лазеры	Биоразлагаемый <sup>3</sup>		<sup>3</sup> Каппителли и соавт., 2006
<b>POM</b>	Поли(оксиметилен), тж. «ацеталь»	Углеводороды	Высококачественные детали (напр., в автомобильной промышленности)			
<b>PP</b>	Полипропилен	Углеводороды	Упаковка, контейнеры, мебель, трубы			
<b>PS</b>	Полистирол	Углеводороды	Пищевая упаковка			
<b>EPS</b>	Пенополистирол	Углеводороды	Теплоизоляция, термопосуда, поплавки, упаковка			
<b>PU (PUR)</b>	Полиуретан	Углеводороды	Изоляция, колеса, прокладки и уплотнители, связывающие материалы			
<b>PVA</b>	Поли(виниловый спирт)	Углеводороды	Ламинирование бумаги	Биоразлагаемый		
<b>PVA</b>	Поли(винилацетат)	Углеводороды	Связывающие материалы			
<b>PVC</b>	Поли(винилхлорид)	Углеводороды	Трубы, изоляция кабелей, строительство			
<b>Вискоза</b>	Вискоза	Биомасса (целлюлоза)	Волокна, одежда	Биоразлагаемый	Биоразлагаемый	
<b>SBR</b>	Бутадиен-стирольный каучук	Углеводороды	Пневматические шины, прокладки, жевательная резинка, уплотнители			
	Крахмал	Биомасса	Упаковка, сумки, отдельные марки пластика (напр., Mater-Bi™)	Биоразлагаемый в почве и компостных ямах <sup>6</sup>	Минимальное разложение в прибрежных водах <sup>6</sup>	<sup>6</sup> Ачинели и соавт. 2012

Использование для производства биопластика органических отходов можно рассматривать как часть циклической экономики — такой подход превращает поток «ресурс-производство-использование-отходы» в замкнутый цикл.

условиях сокращения биологического разнообразия). Одной из особенностей производства пластика из биомассы является относительная дороговизна по сравнению с производством из ископаемого топлива (Секигучи и соавт., 2011, Пемба и соавт., 2014).

Можно с большой вероятностью утверждать, что самыми распространенными видами биоосновного пластика являются биополиэтилен и поли(лактид). В то время как большая часть обычного полиэтилена производится из углеводородного сырья, биополиэтилен производится полностью из биомассы. Аналогично биополиамид-11 производится из растительного масла, а поли(лактид) — из молочной кислоты, получаемой из сельскохозяйственных культур, таких как кукуруза и сахарный тростник.

## 2.4 Биоосновный пластик

В качестве сырья для таких видов пластика используют органические отходы или специально выращиваемые культуры (таблица 2.4). Использование органических отходов можно рассматривать как часть циклической экономики — такой подход превращает поток «ресурс-производство-использование-отходы» в замкнутый цикл. Специальное выращивание культур потенциально создает больше проблем — необходимо выделять освоенную землю, которая могла бы использоваться для выращивания пищевых культур (в условиях растущей нехватки продовольствия) или осваивать новую (в

## 2.5 Биопластик

Термин «биопластик» на данный момент используется в самых разнообразных значениях. Под биопластиком может подразумеваться как биоразлагаемый, так и биоосновный пластик, который может не являться биоразлагаемым (рис. 2.3, Токива и соавт., 2009). Во избежание путаницы предлагается использовать термин применительно как к сырью, используемому для производства полимера, так и к его свойствам.

Таблица 2.4 Распространенные примеры «биопластика»

ПОЛИМЕР	СЫРЬЕ	ПРИМЕНЕНИЕ
Целлофан	Целлюлоза (древесина, хлопок, конопля)	Упаковка Базовый слой для клейкой ленты Диализные трубки
Хитозан	Хитон	Культивирование тканей, лечение ранений, доставка лекарственных веществ
Вискоза	Целлюлоза (в т.ч. древесина)	Нити — одежда

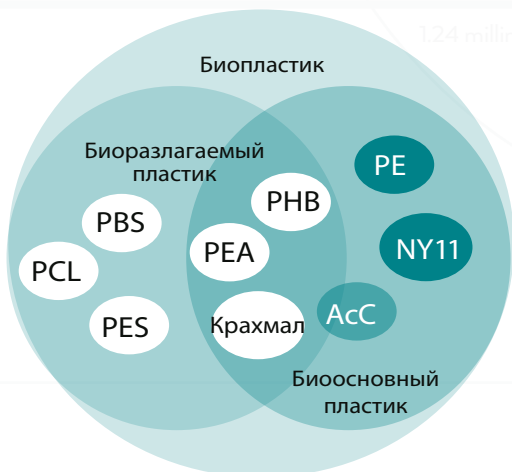
<sup>§</sup> Большинство типов полиамида получают из ископаемого топлива



ФОТО: АУТ БЕКЕРС (DOUG BECKERS) / CREATIVE COMMONS



1.0542 millimeters



124 millimeters

Одной из особенностей производства пластика из биомассы является относительная дороговизна по сравнению с производством из ископаемого топлива.

Рис. 2.3 Биопластик: биоосновный и биоразлагаемый (Токива и соавт., 2009; доступно по лицензии Creative Commons Attribution).

0.002 millimeters

# 3

## Фрагментация, разложение и биоразложение



ФОТО: © РАЙСР АЙХИНГЕР (RALPH AICHINGER) / CREATIVE COMMONS

# ФРАГМЕНТАЦИЯ, РАЗЛОЖЕНИЕ И БИОРАЗЛОЖЕНИЕ

## 3.1 Процесс разложения

### Фрагментация

Степень разложения синтетического полимера зависит как от его свойств, так и от условий среды, в которой он находится (Мохи и соавт., 2008). Полной минерализацией исходного полимера называют момент его полного распада на воду, диоксид углерода, метан и аммиак, пропорции которых зависят от количества присутствующего кислорода (Эубелер и соавт., 2009).

Фрагментация и биоразложение происходят вследствие фотоокисления (УФ-окисления), термоокисления и воздействия микроорганизмов. В морской среде доминирующим фактором является УФ-излучение. Оно обуславливает повышение хрупкости материала, его растрескивание и фрагментацию, приводя к образованию микропластика (Эндреди, 2011). Фрагментация проходит быстрее, когда пластиковый мусор находится под прямым воздействием УФ-излучения в прибрежных водах. Более высокие температура и уровень содержания кислорода в воде, а также механическая абразия (под воздействием волн) ускоряют фрагментацию. После попадания пластика в донные отложения, его погружения в толщу воды или нарастания на нем органических или неорганических пленок (что в морской воде происходит очень быстро) фрагментация значительно замедляется. Пластиковые объекты, такие как бутылки из ПЕТ, пакеты и рыболовные сети, найденные на дне океана на большой глубине, практически не обнаруживают признаков порчи (Фам и соавт., 2014). Фрагментация замедляется в еще большей степени при добавлении в полимеры УФ- и термостабилизирующих присадок.

### Биоразложение

Биоразложение — это полный или частичный распад полимера на углерод, водород и кислород в результате гидролиза, фоторазложения и деятельности микроорганизмов (выделения энзимов и внутриклеточных процессов). Возможность биоразложения в большой степени зависит от типа полимера и условий окружающей среды. Литература по вопросам биоразложения широкого круга синтетических полимеров широко изучена Эубелером

и соавторами (2009, 2010). Частичное биоразложение может привести к образованию нанофрагментов и других синтетических продуктов распада (Ламберт и соавт., 2013).

Большое количество государственных и международных стандартов в отношении компостируемых и биоразлагаемых материалов уже разработано или находится в процессе разработки такими организациями, как ISO (International Organization for Standardization, Международная организация по стандартизации), EN (European Norm, Европейские

1.002 millimeters

Продукция, маркированная как «биоразлагаемая», должна соответствовать стандартам компостируемости — например, ASTM 6400 (США), EN 13432 (ЕС) или ISO 17088 (международный).

стандарты) и ASTM (American Society for Testing and Materials, Американское общество по испытанию материалов). Такие стандарты применяются к условиям, возможным в промышленных компостерах, температуры в которых достигают 70° С. Стандарт EN требует преобразования 90% органического вещества в CO<sub>2</sub> в течение 6 месяцев, а также остатка не более 30% после просеивания через сетку с размером ячейки 2 мм после 3 месяцев компостирования<sup>1</sup>. Недавний обзор литературы, проведенный организацией PlasticsEurope, показал, что большинство видов пластика, маркированного как биоразлагаемый, соответствует стандарту EN 13432 или его эквивалентам (Деконинк и Де Уайлд, 2013). Процедуры испытаний включают измерение таких

1.054

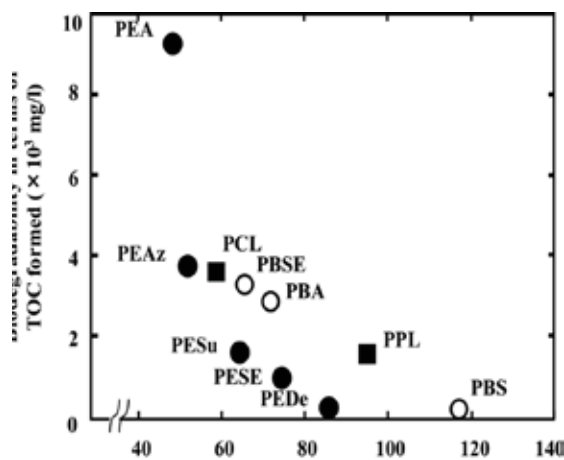
<sup>1</sup> EN 13432:2000. Упаковка. Требования, критерии и схема утилизации упаковки посредством компостирования и биологического разложения. <http://www.bpiworld.org/page-190437> (на 8 января 2020 г. страница недоступна, но существует российский стандарт, являющийся переводом упомянутого: <http://docs.cntd.ru/document/1200098733> — прим. пепев.).



показателей, как потеря массы и выход  $\text{CO}_2$ . Однако пластик может сохранять такие важные физические свойства, как общая форма или прочность на разрыв, даже при значительной потере массы.

Организация ASTM также разработала стандарт «Неплавучие биологически разлагаемые пластики в морской среде» (ASTM D7081-05). На данный момент стандарт отозван (без возможности восстановления на 8 января 2020; на момент публикации исходной версии материала проходил процедуру баллотирования на восстановление — прим. перев.)<sup>2</sup>. Также в разработке находится дополнительный стандарт ASTM WK42833 «Новая методика определения степени аэробного биоразложения пластмасс, полностью погруженных в песчаные донные отложения, в контролируемых лабораторных условиях» (на 8 февраля 2020 г. никакой информации по дальнейшей разработке стандарта нет — прим. перев.).

2 <http://www.astm.org/Standards/D7081.htm>



**Рис. 3.1** Соотношение температуры плавления ( $T_m$  °C) и степени биоразлагаемости (ТОС — общее содержание органического углерода,  $\text{мг/л}^{-1}$ ) липазой грибка *Rhizopus delemar*. (Токива и соавт., 2009; доступно по лицензии Creative Commons Attribution).

1.002 millimeters



ФОТО: © ФОРЕСТ И КИМ СТАРР (FOREST AND KIM STARR) / CREATIVE COMMONS

20

**БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ ПЛАСТИК И МОРСКОЙ МУСОР**

ЗАБЛУЖДЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ВЛИЯНИЕ НА МИРОВОЙ ОКЕАН

0.002 millimeters

На биоразлагаемость полимера влияет множество его собственных характеристик. Чем выше молекулярная масса (Эубелер и соавт., 2010), температура плавления и степень кристалличности, тем меньше способность полимера к биоразложению (рис. 3.1, Токива и соавт., 2009).

### 3.2 Биологически неразлагаемый пластик

Множество распространенных полимеров можно считать не разлагаемыми биологически. Под этим подразумевается, что полная минерализация, для которой требуется частичная фрагментация, ускоряемая УФ-излучением, высокими температурами и присутствием кислорода, происходит настолько медленно, что ее скорость можно считать пренебрежительно малой. Прямое воздействие УФ-излучения, которое чаще происходит на суше и в прибрежных водах тропической и субтропической климатических зон, может привести к частичной фрагментации таких материалов, как полиэтиленовая пленка без УФ-стабилизаторов (рис. 3.2). Однако, как только пластик погружается в донные отложения или слои воды или покрывается органической или неорганической пленкой, скорость фрагментации значительно снижается. Распространенные примеры: PE, PET, PA (полиамид-11), PS, EP, PU, PVA, PVC и SBR (таблица 2.3).

### 3.3 «Биоразлагаемый» пластик

Биоразлагаемыми называются полимеры, легко распадающиеся вследствие гидролиза — процесса разрушения химических связей в присутствии воды (GESAMP 2015). Процесс ускоряется в благоприятных условиях окружающей среды и в присутствии микроорганизмов.

Некоторые биоразлагаемые полимеры разработаны специально для использования в медицинской промышленности (таблица 2.3). Они могут метаболизироваться телом человека вследствие гидролиза, катализируемого активностью энзимов. Некоторые полимеры, такие как поли(гликолевая кислота) и ее сополимеры, используются для производства хирургических нитей, другие применяются для медленной доставки лекарственных препаратов (например, при лечении некоторых видов рака) или вакцин к внутренним органам (Пилле и соавт., 2013, Бавсар и Амиджи, 2007). Также есть специальные полимеры, используемые для создания временных решеток для выращивания клеток (Вудрафф и Хатмэтчер, 2010). Несмотря на особые свойства, далеко не все подобные полимеры бы-



**Рис. 3.2** Фрагментация полиэтилена под воздействием УФ-лучей в холодном климате, 61,6° с.ш.; (а) стандартная ПЭ-пленка, (б) ПЭ-пленка с УФ-стабилизаторами для использования в садоводстве.  
© Питер Кершоу (Peter Kershaw)

Чем выше молекулярная масса, температура плавления и степень кристалличности, тем меньше способность полимера к биоразложению.



За пределами человеческого тела скорость биоразложения значительно зависит от окружающей среды, условия которой подвержены значительным изменениям.

стро разлагаются во внешней среде. Вне человеческого тела скорость биоразложения значительно зависит от окружающей среды, условия которой (температура, влажность, содержание кислорода, присутствие микроорганизмов, УФ-излучение и т.д.) подвержены значительным изменениям. Например, поликапролактон и полилактид используются не только для краткосрочного применения в медицинских целях, но и в 3D-печати для производства прочных и долговечных деталей.

Различные виды пластика, произведенные из одного и того же полимера, могут обнаруживать значительные отличия в физических свойствах и скорости биоразложения. Например, исследование целлюлозных волокон показало, что наивысшей способностью к биоразложению обладает вискоза, меньшей — хлопок, самой низкой — ацетат (Пак и соавт., 2004). Испытания включали в себя погружение в слой почвы и активированный осадок сточных вод, а также гидролиз под воздействием энзимов. Была обнаружена зависимость степени биоразлагаемости от кристалличности волокон (вискоза обладает самой низкой кристалличностью) и переплетения нитей. Биопластик PLA — это полиэстер, производимый из молочной кислоты, которую получают из кукурузы, сахарного тростника и других растений. Он обладает способностью к биоразложению под действием разнообразных микроорганизмов (Эубелер и соавт., 2010). Однако, несмотря на биологическое происхождение полимера, его разложение в натуральных условиях происходит очень медленно и для завершения требует промышленного компостирования (GESAMP 2015).

Полимер, маркированный как «биоразлагаемый», может фактически разлагаться только в особых условиях, часто недостижимых в естественной среде (рис. 3.3). Это может привести к недопониманию конечным потребителем сути понятия «биоразлагаемость». Например, сегодня можно часто встретить «биоразлагаемые» пакеты в большинстве супермаркетов. Однако вполне возможно, что они будут разлагаться полностью только в промышленных компостерах (см. раздел 3.1) и не будут разлагаться в компостных кучах и природных условиях. Недостаточная ясность может вызвать формирование у покупателей привычек, которые приведут к еще большему замусориванию естественной сре-

ды (см. гл. 5). Штат Калифорния, США, принял законодательные акты в отношении использования терминов «биоразлагаемый» и «компостируемый» на потребительской упаковке.

### 3.4. Оксоразлагаемый пластик

Этим термином обозначают обычные полимеры, такие как полиэтилен, содержащие металлические присадки (например, марганец). Присадки выступают в качестве катализатора окисления (прооксиданта) и ускоряют первоначальную оксидацию и фрагментацию (Кьеллини и соавт., 2006). Иногда такие полимеры также называют оксобiorазлагаемыми. Первоначальное разложение приводит к образованию множества небольших фрагментов («микропластика»), дальнейшая судьба которых остается неясной (Эубелер и соавт., 2010, Томас и соавт., 2010). Как и для всех остальных форм разложения, степень фрагментации полимера и его усвоения микроорганизмами здесь зависит от условий окружающей среды. На данный момент в открытом доступе не опубликовано доказательств того, что оксоразлагаемые пластики полностью минерализуются в окружающей среде (за исключением промышленных компостеров). При этом использование катализаторов неизбежно ограничивает сферу применения полимера, поскольку изменяет его механические свойства.

Выводы настоящей брошюры основаны на доказательствах, приводимых в рецензируемой литературе. Однако необходимо признать, что степень, в которой оксоразлагаемый пластик действительно является более «экологичным» по сравнению с традиционными полимерами, стала темой горячих обсуждений. Очевидно, что по крайней мере частично это связано с коммерческими интересами обеих сторон спора — как сторонников, так и противников использования оксоразлагаемых полимеров. Например, меморандум отраслевой ассоциации European Bioplastics, изданный в 2012 году, оспаривал выводы LCA-исследования в отношении оксоразлагаемых пакетов, изданного производителями прооксидантов (Эдвардс и Паркер, 2012). Не имея желания быть втянутым в эти споры, автор данного исследования все же вынужден указать, что лица, принимающие решения, вряд ли руководствовались исключительно надежными, независимыми и рецензированными научными доказательствами.

Литературный обзор (Деконинк и Де Уайлд, 2013) публикаций по био- и оксоразлагаемым полимерам, изданный организацией Plastics Europe, заключил, что скорость и степень биоразложения оксоразлагаемых видов пластика «как минимум спорна в отношении воспроизводимости».

22

БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ  
ПЛАСТИК И  
МОРСКОЙ МУСОР

ЗАБЛУЖДЕНИЯ,  
ПРОБЛЕМЫ И ВЛИЯНИЕ  
НА МИРОВОЙ ОКЕАН



**Рис. 3.3** Примеры одноразовой пластиковой продукции с маркировкой «оксоразлагаемый» и «100% биоразлагаемый»

Отсутствие единого мнения по вопросу применения оксоразлагаемого пластика явно заметно по количеству правок и обсуждений в одноименной статье на Википедии<sup>3</sup>. По многим из обсуждаемых вопросов имеются полезные комментарии (Нараян, 2009).

В то же время обзор, опубликованный Правительством Великобритании в 2010 году, заключил, что оксоразлагаемый пластик не является менее вредным для окружающей среды, чем традиционный (Томас и соавт., 2010). Рекомендуемыми решениями для утилизации оксоразлагаемого пластика по окончании срока службы авторы видят сжигание (предпочтительно) или захоронение. В дополнение к этому авторы указывают:

«...поскольку [оксоразлагаемый] пластик не разлагается в течение приблизительно 2–5 лет, до начала разложения он остается мусором»

(Томас и соавт., 2010).

Вопрос о необходимости законодательного контроля над рекламой и продвижением продукции из оксоразлагаемых полимеров остается открытым.

Пластик, содержащий прооксиданты, не рекомендуется отправлять на переработку, поскольку он может снизить качество продукции, производимой из переработанного сырья (Хорничек, 2012). Необходимость законодательного контроля над рекламой и продвижением продукции из оксоразлагаемых полимеров обсуждалась в штате Калифорния, США, и Евросоюзе.

<sup>3</sup> Статья проверена 9 февраля 2015 г. (автором публикации; на 12 января 2020 г. статья [en.wikipedia.org/wiki/OXO-biodegradation](https://en.wikipedia.org/wiki/OXO-biodegradation) остается предметом обсуждений и не приведена в соответствие правилам Википедии — прим. перев.)



# 4

## Поведение «биоразлагаемого» пластика в морской среде



ФОТО: © JENNYVIDS / CREATIVE COMMONS

24

БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ  
ПЛАСТИК

ПОМОЖЕТ ЛИ  
«БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ»  
ПЛАСТИК СУЩЕСТВЕННО  
СОКРАТИТЬ КОЛИЧЕСТВО  
МОРСКОГО МУСОРА?

# ПОВЕДЕНИЕ «БИОРАЗЛАГАЕМОГО» ПЛАСТИКА В МОРСКОЙ СРЕДЕ

## 4.1 Состав пластикового мусора в океане

Пластик встречается в морской среде повсеместно. Опубликовано множество исследований, иллюстрирующих широкий круг полимерных композиций, найденных в морской воде, отложениях и живых организмах (таблица 4.1). Попыток проанализировать пропорции «биоразлагаемого» и «не биоразлагаемого» пластика в океане, по всей видимости, до сих пор не было. Большая часть рынка биоразлагаемого пластика сфокусирована на упаковке, одноразовой потребительской продукции и сельскохозяйственной отрасли. Это предполагает, что биоразлагаемый пластик попадает в океан примерно таким же образом и в таких же пропорциях, как и весь остальной, с поправкой на региональные отличия в интенсивности использования биоразлагаемого пластика. Поскольку количество и типы пластика, попадающего в океан, неизвестны, количество биоразлагаемого пластика, попадающего в океан, также неизвестно.

Объем различных полимеров, присутствующих в морской среде, зависит от местных и региональных источников загрязнения, наличия транспортных маршрутов большой протяженности, свойств материала (размер, форма, плотность) и конкрет-

ных условий (УФ-излучение, температура, содержание кислорода, физические воздействия, биологические факторы). При отборе проб большинством широко используемых методов обычно не учитываются частицы диаметром до 330 мкм, а типы определяемых полимеров обычно ограничиваются наиболее распространенными. Отбор проб в средних слоях воды, а также на дне и рядом с ним, гораздо более ресурсозатратен, чем отбор проб с поверхности воды или береговой линии, и производится гораздо реже.

## 4.2 Судьба биоразлагаемого пластика в океане

### Процессы разложения

Биоразлагаемый пластик ведет себя в океане иначе, чем на суше (в почве, на свалке, в компостере), поскольку условия, необходимые для быстрого биоразложения, чаще всего отсутствуют. Пластик, лежащий на береговой линии, подвергается воздействию УФ-излучения и окисления, обуславливающих фрагментацию; этот процесс ускоряется в регионах с жарким климатом, а также при наличии физической абразии. После того, как крупный объект или фрагмент попадает в донные отложения или толщу воды, скорость фрагментации резко падает. Проводилось не так много экспериментальных исследований биоразложения полимеров в морской воде, к тому же их результаты необходимо интерпретировать в контексте природных условий (УФ-излучение, температура, содержание кислорода, присутствие микроорганизмов), а также характеристик полимера. Например, скорость разложения полиэтилена в тропиках может быть несколько выше в связи с высокими температурами, высоким содержанием кислорода в воде и подходящим набором микроорганизмов, однако, она остается очень низкой (Судакар и соавт., 2007).



ФОТО: © JENNYVIDS / CREATIVE COMMONS

25

БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ  
ПЛАСТИК И  
МОРСКОЙ МУСОР

ЗАБЛУЖДЕНИЯ,  
ПРОБЛЕМЫ И ВЛИЯНИЕ  
НА МИРОВОЙ ОКЕАН



Таблица 4.1. Процентное соотношение полимеров в различных средах (GESAMP, 2015)

СРЕДА	РАЗМЕР	СОСТАВ	ИСТОЧНИК
отложения, береговая линия	< 1 мм	PES (56%), AC (23%), PP (7%), PE (6%), PA (3%).	Браун и соавт. (2011)
отложения, очистные сооружения	< 1 мм	PES (78%), AC (22%)	Браун и соавт. (2011)
отложения, пляж	< 1 мм	PES (35%), PVC (26%), PA (18%), AC, PP, PE, EPS	Браун и соавт. (2008)
отложения, приливная зона и ниже	0,03–0,5 мм	PE (48,4%), PP (34,1%), PP+PE (5,2%), PES (3,6%), PAN (2,6%), PS (3,5%), AKD (1,4%), PVC (0,5%), PVA (0,4%), PA (0,3%)	Вианелло и соавт. (2013)
отложения, пляж	1–5 мм (мелкие фрагменты)	PE (54, 87, 90, 78%), PP (32, 13, 10, 22%)	Карапанаджоти и соавт. (2011)
прибрежные воды, поверхностный микрослой	< 1 мм	AKD (75%), PSA (20%), PP+PE (2%), PE, PET, EPS	Сон и соавт. (2013)
очищенные сточные воды	< 1 мм	PES (67%), AC (17%), PA (16%)	Браун и соавт. (2011)
рыбы	0,13–14,3 мм	PA (35,6%), PES (5,1%), PS (0,9%), LDPE (0,3%) AC (0,3%), вискоза (57,8%)	Лашер и соавт. (2012)
птицы	—	PE (50,5%), PP (22,8%), PC и ABS (3,4%), PS (0,6%), неопределенные (22,8%)	Ямасита и соавт. (2011)

В глубоководных слоях океана рядом с побережьем Японии были собраны бактерии, способные разлагать PCL (Секигучи и соавт., 2011). Под воздействием особых видов *Pseudomonas*, *Alcanivorax* и *Thalassiosira* наблюдалось образование микропор и потеря конструктивной целостности изделий из PCL. Ожидалось, что скорость и степень биоразложения будут зависеть от конкуренции с колониями других видов бактерий, а также от температуры и содержания кислорода. Было обнаружено, что добавление PLA к PUR повышает степень разложения объекта в морской воде (Моравек и соавт., 2009). Однако реакция значительно зависит от температуры, и результаты весьма ограниченно применимы к естественным условиям. Экспериментальные исследования пакетов из полимера Mater-Bi™ на основе крахмала привели к выводу, что использование таких пакетов само по себе не устранил и не ослабит проблему воздействия морского мусора на окружающую среду в связи с низкой скоростью разложения, наблюдаемой в морских экосистемах (Аччинелли и соавт., 2013). Биоразложение устойчивых видов пластика, таких как PE, в морской среде происходит с предельно низкой скоростью. Доказательства того, что разложение поверхности частиц полиэтилена возможно в морской среде, ограничены (Зеттлер и соавт., 2013).

### Взаимодействие с живыми организмами

Множество различных животных проглатывает пластик или запутывается в нем. В кишечниках трупов зубатых китов, морских черепах и чаек, найденных на берегу, при вскрытии часто находят большие количества пластика. Считается, что животные принимают пластиковые объекты за пищу; после проглатывания пластик блокирует кишечник, вызывая голод. Сложно определить, насколько смерть особи обусловлена именно присутствием пластика, но во многих случаях оно определенно являлось существенным фактором. Условия внутри организма могут сильно отличаться от условий окружающей среды (учитывая биохимию кишечника, активность ферментов и воздействие микроорганизмов). Поведение некоторых полимеров внутри организма может отличаться от поведения во внешней среде, но такие отличия недостаточно задокументированы и скорее являются индивидуальными для каждого вида.

Возможно, самым релевантным в этой связи стало исследование разложения пластиковых пакетов в жидкостях желудочно-кишечного тракта двух особей морских черепах: травоядной зеленой черепахи (*Chelonia mydas*) и плотоядного логгерхеда (*Caretta caretta*) (Мюллер и соавт., 2012). Жидкости были собраны из желудка, тонкого кишечника и



толстого кишечника недавно умерших особей. Использовались три типа полимеров: обычный HDPE, оксоразлагаемый и биоразлагаемая смесь PBAT/крахмал (Mater-Bi™).

Изменения массы полимера замерялись в течение 49 дней (стандартная исследовательская процедура), по истечении которых потери массы составили: HDPE — незначительно малые, оксоразлагаемый полимер — незначительно малые, биоразлагаемый — 4,5–8,5%. Это значительно медленнее скорости разложения, заявленной производителем для промышленного компостирования. Исследование показало, что разложение пластика в ЖКТ происходит намного медленнее, чем переваривание нормальной пищи. Более низкая скорость разложения полимера в жидкостях ЖКТ логгерхеда может быть обусловлена отличиями в рационе и, соответственно, действием энзимов.

#### Биоразлагаемые полимеры и «призрачная рыбалка»

Многие рыболовные компании используют для ловли верши и небольшие стационарные сети. Например, по отдельным оценкам эти виды снастей использует около 77 тыс. рыболовецких судов, ведущих промысел в водах Республики Корея (Ким и соавт., 2014а). Они часто теряются в связи с запутыванием или сложными погодными условиями. По оценкам, только в заливе Мэн ежегодно теряется 175 тыс. ловушек для лобстеров.

В ходе некоторых исследований была изучена возможная польза от применения биоразлагаемых полимеров при производстве рыболовных снастей для сокращения вреда от «призрачной рыбалки» (англ. ghost fishing) — так называется явление, когда потерянные или выброшенные рыболовные снасти продолжают ловить представителей морской фауны, приводя к нежелательному сокращению популяций. Ким и соавторы (2014b) провели испытания — как механические, так и оценку эффективности — верш для морских угрей, основные части которых были изготовлены из биоразлагаемых полимеров (PBS), в сравнении с доступными в свободной продаже вершами, широко используемыми в республике Корея. Оба вида верш обладали схожей эффективностью, но верши из биоразлагаемого пластика захватывали меньше мелких особей, что оказалось неожиданным и приятным дополнением. Обычно рыболовные компании заменяют верши каждые два года, и прочности биоразлагаемых компонентов достаточно на этот период. Основным преимуществом верш из биоразлагаемого пластика могло стать то, что использование биоразлагаемых компонентов, особенно специально разработанных для быстрого разложения в морской среде, могло бы сократить масштабы «призрачной рыбалки». Основным недостатком является более высокая стоимость биоразлагаемых снастей — они вряд ли будут использоваться в отрасли без финансовой поддержки.

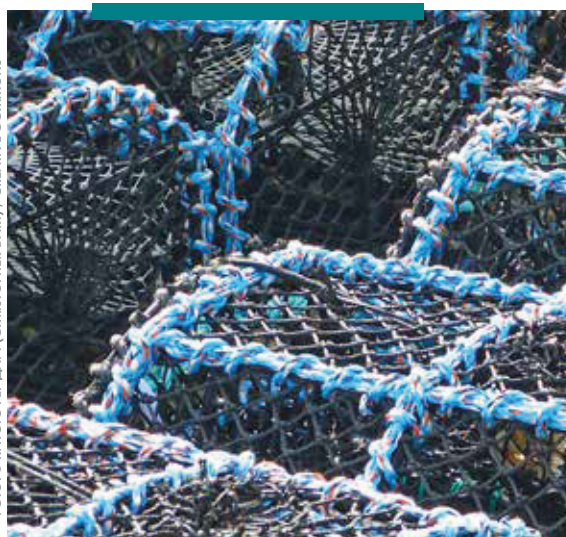


ФОТО: © КРИСТОФЕР ДАРТ (CHRISTOPHER DART) / CREATIVE COMMONS

**Таблица 4.2** Потери массы трех различных типов пластиковых пакетов в жидкостях ЖКТ зеленой черепахи (*Chelonia mydas*) и логгерхеда (*Caretta caretta*) (Мюллер и соавт., 2012)

ТИП ПОЛИМЕРА	ИСХОДНЫЙ ОБЪЕКТ	ПОТЕРИ МАССЫ ЧЕРЕЗ 49 ДНЕЙ
HDPE	Пластиковый пакет	незначительно малые
Оксоразлагаемый	Пластиковый пакет — PE с прооксидантом (технология d2w™)	незначительно малые
Биоразлагаемый	Пластиковый пакет — полимер Mater-Bi™ на базе крахмала производства компании BioBag®	Зеленая черепаха - 8,5% Логгерхед - 4,5%

Эксперименты по применению компонентов из PE и биоразлагаемого полимера (PBS) при производстве сетей для ловли осьминогов (*Octopus minor*) в Корее дали менее однозначные результаты: качество ловли снастей, содержащих биоразлагаемые полимеры, значительно ниже (Ким и соавт., 2014а). Осьминоги очень чувствительны к жесткости крученой пряжи, используемой в снастях. Это лишнее дает понять, что, прежде чем давать рекомендации на тему того, какие снасти «меньше вредят окружающей среде», нужно хорошо изучить поведение особей и характеристики процесса ловли. Кроме того, модифицированные снасти оказались дороже, чем произведенные из стандартного полиэтилена.

1.05

# 5

## Общественное мнение и закономерности поведения



ФОТО: © ЛЮСИ ЛАМБРЕИ (LUCY LAMBREKI) / CREATIVE COMMONS

28

БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ  
ПЛАСТИК

ПОМОЖЕТ ЛИ  
«БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ»  
ПЛАСТИК СУЩЕСТВЕННО  
СОКРАТИТЬ КОЛИЧЕСТВО  
МОРСКОГО МУСОРА?

# ОБЩЕСТВЕННОЕ МНЕНИЕ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ

Множество проведенных исследований показало, что на отношение людей к морской среде в целом влияют возраст опрашиваемых, уровень образования, пол и культурный опыт. Касательно отношения к морскому мусору и факторов, влияющих на поведение человека в этой связи, было проведено недостаточно исследований (Уайлс и соавт., 2014). Изучение общественного мнения в европейских странах показало, что наибольшая ответственность за сокращение морского мусора возлагается на государственную политику, одна-

ко самыми продуктивными в этом деле считаются природоохранные организации (личная переписка Бонни Хартли).

Взгляды людей влияют как на поведение индивидуумов, так и на принятие решений в области законодательства и коммерческой деятельности. Существуют некоторые, пусть и ограниченные, доказательства тому, что некоторые люди предпочитают изменению поведения и привычек «технические решения». В настоящем контексте маркировку продукции как «биоразлагаемая» можно считать именно таким «техническим решением» — уловкой, снимающей ответственность с конечного потребителя. Более низкий уровень ответственности приводит к нежеланию выполнять все необходимые действия (Клекнер, 2013). Опрос, посвященный привычке мусорить у молодежи Лос-Анджелеса, показал, что маркировка «биоразлагаемый» на продукции с большой вероятностью приведет к тому, что она будет выброшена, а не сдана на переработку надлежащим образом (кампания Keep Los Angeles Beautiful, 2009). Неизвестно, распространяется ли подобный подход на различные возрастные и культурные группы, а также различные регионы мира, поэтому имеет смысл провести больше исследований в этом направлении.



Маркировку продукции как «биоразлагаемая» можно считать «техническим решением» — уловкой, снимающей ответственность с конечного потребителя.



# 6

## ВЫВОДЫ

---



ФОТО: © РОБ (ROB) (WWW.VBMEKXICORER.COM), CREATIVE COMMONS

30  
БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ  
ПЛАСТИК

ПОМОЖЕТ ЛИ  
«БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ»  
ПЛАСТИК СУЩЕСТВЕННО  
СОКРАТИТЬ КОЛИЧЕСТВО  
МОРСКОГО МУСОРА?

## ВЫВОДЫ

- Пластиковый мусор в огромном количестве присутствует в морской среде, имеет множество источников происхождения и состоит из самых различных полимеров и сополимеров, которые можно объединить в относительно небольшое число групп.
- Наиболее универсальные полимеры с востребованными химическими и механическими свойствами (такие как PE, PP, PVC), практически не способны к биоразложению, особенно в морской среде.
- Полимеры, биоразлагаемые в наземной среде при благоприятных условиях (такие как AcC, PBS, PCL, PES, PVA), разлагаются биологически и в морской среде, но намного медленнее, и их широкое использование с большой вероятностью приведет к продолжению замусоривания среды и негативному влиянию на нее.
- Как правило, биоразлагаемые полимеры значительно дороже традиционных. Обоснованный переход на биоразлагаемые полимеры с более дешевых альтернатив (например, для производства основных компонентов рыболовных снастей) может потребовать финансовой поддержки.
- Заявлено, что добавление прооксидантов, таких как марганец, в оксоразлагаемые полимеры ускоряет фрагментацию под воздействием УФ-излучения и кислорода. Дальнейшая судьба фрагментов (т.н. микропластика) неясна, но следует предполагать, что оксоразлагаемые полимеры увеличат количество микропластика в океанах, до тех пор, пока не будут представлены независимые исчерпывающие доказательства обратного. В настоящий момент использование таких полимеров весьма ограничено.
- Фрагментация оксоразлагаемых полимеров в условиях морской среды проходит медленно: произведенные из них объекты сохраняют форму более 2–5 лет, продолжая загрязнять среду и приводя к нежелательным последствиям.
- Имеющиеся заявления относительно способностей определенных типов полимеров к биоразложению в окружающей среде и их опровержения зачастую обусловлены коммерческими интересами сторон.
- Имеются данные о том, что маркировка продукта как биоразлагаемого влияет на поведение потребителей: «биоразлагаемый» пакет с большей вероятностью будет выброшен ненадлежащим образом.
- На основании доступных данных можно утверждать, что биоразлагаемый пластик не сыграет важной роли в сокращении количества морского мусора.

1.0542 millimeters

1.24 millimeters

0.002 millimeters



# ЛИТЕРАТУРА

Accinelli, C., M. L. Sacca, M. Mencarelli and A. Vicari (2012). "Deterioration of bioplastic carrier bags in the environment and assessment of a new recycling alternative." *Chemosphere* 89(2): 136-143.

Andrady, A. (2011). "Microplastics in the marine environment." *Marine Pollution Bulletin* 62(8): 1596-1605.

Browne, M. A., P. Crump, S. J. Niven, E. Teuten, A. Tonkin, T. Galloway and R. Thompson (2011). "Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks." *Environmental Science & Technology* 45(21): 9175-9179.

Browne, M. A., A. Dissanayake, T. S. Galloway, D. M. Lowe and R. C. Thompson (2008). "Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.)." *Environmental Science and Technology* 42(13): 5026-5031.

Cappitelli, F., P. Principi and C. Sorlini (2006). "Biodeterioration of modern materials in contemporary collections: can biotechnology help?" *Trends in Biotechnology* 24(8): 350-354.

Chiellini, E., A. Corti, S. D'Antone and R. Baciù (2006). "Oxo-biodegradable carbon backbone polymers - Oxidative degradation of polyethylene under accelerated test conditions." *Polymer Degradation and Stability* 91(11): 2739-2747.

Deconinck, S. and De Wilde, B. (2013). "Benefits and challenges of bio- and oxy-degradable plastics. A comparative literature study." Executive Summary. Study DSL-1, on behalf of Plastics Europe AISBL, Belgium, 8pp.

Edwards, C. and Parker, G. (2012) "A life cycle assessment of oxy-biodegradable, compostable and conventional bags." Interetek Expert Services Report on behalf of Symphony Environmental Ltd. 46pp.

Eubeler, J. P., M. Bernhard and T. P. Knepper (2010). "Environmental biodegradation of synthetic polymers II. Biodegradation of different polymer groups." *TrAC-Trends in Analytical Chemistry* 29(1): 84-100.

Eubeler, J. P., S. Zok, M. Bernhard and T. P. Knepper (2009). "Environmental biodegradation of synthetic polymers I. Test methodologies and procedures." *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 28(9): 1057-1072.

GESAMP (2015). "Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment - a global assessment."

GESAMP Reports and Studies Series. GESAMP (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection).

Guo, B., L. Glavas and A.-C. Albertsson (2013). "Biodegradable and electrically conducting polymers for biomedical applications." *Progress in Polymer Science* 38(9): 1263-1286.

Hornitschek, B. (2012). Impact of degradable and oxy-degradable plastics carrier bags on mechanical recycling. Report by the Transfer Center for Polymer Technology (TCKT) on behalf of the European Plastic Converters (EuPC). 22pp.

Karapanagioti, H. K., S. Endo, Y. Ogata and H. Takada (2011). "Diffuse pollution by persistent organic pollutants as measured in plastic pellets sampled from various beaches in Greece." *Marine Pollution Bulletin* 62(2): 312-317.

Keep Los Angeles Beautiful (2009) "Littering and the iGeneration: City-wide intercept study of youth litter behaviour in Los Angeles." Session paper at XIII Environmental Psychology Conference Granada, June 23-26, 2015 <http://www.congresopsicamb2015.com> (Accessed 10 Aug 2015)

Kim, S., S. Park and K. Lee (2014a). "Fishing Performance of an Octopus minor Net Pot Made of Biodegradable Twines." *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 14(1): 21-30.

Kim, S.-G., W.-I. L. Lee and M. Yuseok (2014b). "The estimation of derelict fishing gear in the coastal waters of South Korea: Trap and gill-net fisheries." *Marine Policy* 46(0): 119-122.

Klöckner, C.A. (2013). A comprehensive model of the psychology of environmental behaviour—A meta-analysis. *Global Environmental Change*, 23(5), 1028-1038.

Lambert, S., C. J. Sinclair, E. L. Bradley and A. B. A. Boxall (2013). "Environmental fate of processed natural rubber latex." *Environmental Science-Processes & Impacts* 15(7): 1359-1368.

Lusher, A. L., M. McHugh and R. C. Thompson (2013). "Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel." *Marine Pollution Bulletin* 67(1-2): 94-99.

Mohee, R. and G. Unmar (2007). "Determining biodegradability of plastic materials under controlled and natural composting environments." *Waste Management* 27(11): 1486-1493.

1.002

32

БИОРАЗЛАГАЕМЫЙ  
ПЛАСТИК И  
МОРСКОЙ МУСОР

ЗАБЛУЖДЕНИЯ,  
ПРОБЛЕМЫ И ВЛИЯНИЕ  
НА МИРОВОЙ ОКЕАН

0.002 millimeters

Moravek, S. J., M. K. Hassan, D. J. Drake, T. R. Cooper, J. S. Wiggins, K. A. Mauritz and R. F. Storey (2010). "Seawater Degradable Thermoplastic Polyurethanes." *Journal of Applied Polymer Science* 115(3): 1873-1880.

Müller, C., K. Townsend and J. Matschullat (2012). "Experimental degradation of polymer shopping bags (standard and degradable plastic, and biodegradable) in the gastrointestinal fluids of sea turtles." *Science of The Total Environment* 416(0): 464-467.

Muthu, S. S., Y. Li, J.-Y. Hu and P.-Y. Mok (2012). "Recyclability Potential Index (RPI): The concept and quantification of RPI for textile fibres." *Ecological Indicators* 18(0): 58-62.

Narayan, R. (2009). "Biodegradability - sorting through facts and claims." *Bioplastics Magazine* 4:28-31

Park, C. H., Y. K. Kang and S. S. Im (2004). "Biodegradability of cellulose fabrics." *Journal of Applied Polymer Science* 94(1): 248-253.

Pemba, A. G., M. Rostagno, T. A. Lee and S. A. Miller (2014). "Cyclic and spirocyclic polyacetal ethers from lignin-based aromatics." *Polymer Chemistry* 5(9): 3214-3221.

Pham, C. K., E. Ramirez-Llodra, C. H. S. Alt, T. Amaro, M. Bergmann, M. Canals, J. B. Company, J. Davies, G. Duineveld, F. Galgani, K. L. Howell, V. A. I. Huvenne, E. Isidro, D. O. B. Jones, G. Lastras, T. Morato, J. N. Gomes-Pereira, A. Purser, H. Stewart, I. Tojeira, X. Tubau, D. Van Rooij and P. A. Tyler (2014). "Marine Litter Distribution and Density in European Seas, from the Shelves to Deep Basins." *PLoS ONE* 9(4): e95839.

Pillay, V., T.-S. Tsai, Y. E. Choonara, L. C. du Toit, P. Kumar, G. Modi, D. Naidoo, L. K. Tomar, C. Tyagi and V. M. K. Ndesendo (2014). "A review of integrating electroactive polymers as responsive systems for specialized drug delivery applications." *Journal of Biomedical Materials Research Part A* 102(6): 2039-2054.

Sekiguchi, T., A. Saika, K. Nomura, T. Watanabe, T. Watanabe, Y. Fujimoto, M. Enoki, T. Sato, C. Kato and H. Kanehiro (2011). "Biodegradation of aliphatic polyesters soaked in deep seawaters and isolation of poly( $\epsilon$ -caprolactone)-degrading bacteria." *Polymer Degradation and Stability* 96(7): 1397-1403.

Shah, A. A., F. Hasan, A. Hameed and S. Ahmed (2008). "Biological degradation of plastics: A comprehensive review." *Biotechnology Advances* 26(3): 246-265.

Shen, L., E. Worrell and M. K. Patel (2010). "Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres." *Resources, Conservation and Recycling* 55(2): 260-274.

Song, Y. K., S. H. Hong, M. Jang, J.-H. Kang, O. Y. Kwon, G. M. Han and W. J. Shim (2014). "Large Accumulation of Micro-sized Synthetic Polymer Particles in the Sea Surface Microlayer." *Environmental Science & Technology* 48(16): 9014-9021.

Sudhakar, M., C. Priyadarshini, M. Doble, P. Sriyutha Murthy and R. Venkatesan (2007). "Marine bacteria mediated degradation of nylon 66 and 6." *International Biodeterioration & Biodegradation* 60(3): 144-151.

Thomas, N., Clarke, J., Mclauchlin, A. and Patrick, S. (2010). "Assessing the environmental impacts of oxy-degradable plastics across their life cycle." Research Report for the Department of Environment, Food and Rural Affairs, London, UK. 104pp.

Tokiwa, Y., B. Calabia, C. Ugwu and S. Aiba (2009). "Biodegradability of Plastics." *International Journal of Molecular Sciences* 10(9): 3722-3742.

Vianello, A., A. Boldrin, P. Guerriero, V. Moschino, R. Rella, A. Sturaro and L. Da Ros (2013). "Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification." *Estuarine Coastal and Shelf Science* 130: 54-61.

Woodruff, M. A. and D. W. Hutmacher (2010). "The return of a forgotten polymer-Polycaprolactone in the 21st century." *Progress in Polymer Science* 35(10): 1217-1256.

Wyles, K. J., Pahl, S. & Thompson, R. C. (2014) "Perceived risks and benefits of recreational visits to the marine environment: Integrating impacts on the environment and impacts on the visitor." *Ocean & Coastal Management*, 88 pp 53-63.

Yamashita, R., H. Takada, M.-a. Fukuwaka and Y. Watanuki (2011). "Physical and chemical effects of ingested plastic debris on short-tailed shearwaters, *Puffinus tenuirostris*, in the North Pacific Ocean." *Marine Pollution Bulletin* 62(12): 2845-2849.

Yang, J., Y. Yang, W.-M. Wu, J. Zhao and L. Jiang (2014). "Evidence of Polyethylene Biodegradation by Bacterial Strains from the Guts of Plastic-Eating Waxworms." *Environmental Science & Technology* 48(23): 13776-13784

Zettler, E. R., T. J. Mincer and L. A. Amaral-Zettler (2013). "Life in the "Plastisphere": Microbial Communities on Plastic Marine Debris." *Environmental Science & Technology* 47(13): 7137-7146.

delivery systems: an application update. *International Journal of Cosmetic Science* 30: 19-33.

[www.unep.org](http://www.unep.org)

Программа ООН по проблемам  
окружающей среды (UNEP)  
п/я 30552 (00100), Найроби, Кения  
Тел.: (254 20) 7621234  
Факс: (254 20) 7623927  
Эл. почта: [publications@unep.org](mailto:publications@unep.org)  
Веб-сайт: [www.unep.org](http://www.unep.org)



1,002 мм

0,0004-1,24 мм

1,0542 мм

1,24 мм

