

УДК 504.45.064

## **Закономерности биоразрушения полигидроксиалканоатов на территории Вьетнама и Центральной Сибири**

**С.В. Прудникова<sup>а</sup>, К.И. Коробихина<sup>а</sup>,  
А.Н. Бояндин<sup>а,б\*</sup>, Т.Г. Волова<sup>а,б</sup>**

<sup>а</sup> *Сибирский федеральный университет,  
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

<sup>б</sup> *Институт биофизики СО РАН,  
Россия 660036, Красноярск, Академгородок, 50<sup>1</sup>*

Received 10.09.2012, received in revised form 17.07.2012, accepted 24.09.2012

*Изучена биодegradация полигидроксиалканоатов (ПГА) в экосистемах, расположенных в различных регионах и климатических условиях, и установлено, что периоды, в течение которых масса полимера падает на 1/2 от исходной, могут существенно варьировать в зависимости от численности, видовой принадлежности и физиологической активности микроорганизмов, определяемой характеристикой природной среды, прежде всего температурным режимом и влажностью почвы. Характер биоразрушения также зависит от состава ПГА (сополимерные образцы разрушаются быстрее в сибирских почвах, гомополимерные – в тропических), метода получения и формы полимерного изделия (двумерные формы разрушаются активнее объемных прессованных). Отличия видового состава идентифицированных ключевых микроорганизмов-деструкторов объясняют выявленные особенности биоразрушения ПГА в различных экосистемах.*

*Ключевые слова: полигидроксиалканоаты, биодegradация, микроорганизмы-деструкторы.*

### **Введение**

В настоящее время в результате активной хозяйственной деятельности на фоне роста населения планеты во все более широком масштабе возрастает производство и потребление химических веществ. В этой связи неуклонно увеличивается количество проблем, связанных с охраной природы. Син-

тетические полимерные материалы стали неотъемлемой частью современной жизни, однако их применение и накопление в биосфере становится глобальной экологической проблемой. Объемы выпуска синтетических пластмасс приближаются к 300 млн т в год; их основная часть скапливается на свалках, так как повторной переработке в разви-

\* Corresponding author E-mail address: araneus@mail.ru

<sup>1</sup> © Siberian Federal University. All rights reserved

тых странах подвергается не более 16-20 % (Kijchavengkul, Augas, 2008; Chanprateep, 2010). Под полигоны и свалки твердых бытовых отходов ежегодно отчуждаются десятки тысяч плодородных земель; полиэтиленовый мусор выводит из строя дренажные системы городов, загрязняет территории. В Мировом океане образовались «острова», преимущественно состоящие из полиэтиленового и пластикового мусора, представляющие угрозу для биоты; критическая загрязненность гидросферы чревата катастрофическими последствиями (Moore et al., 2001). Это делает необходимым переход на новые технологии и средства, включая новые полимерные материалы, не наносящие вреда окружающей среде и подлежащие рециклингу.

Среди перспективных полимерных материалов активно рассматриваются микробные полигидроксиалканоаты (ПГА) – полимеры гидроксипроизводных жирных кислот (так называемые биопластики), которые обладают спектром полезных свойств, включая биосовместимость и биоразрушаемость (Sudech, Doi, 2000; Volova, 2004; Волова, Шишацкая, 2011). Наблюдаемое сегодня наращивание объемов выпуска и расширение сфер применения ПГА делают необходимым изучение способности окружающей среды к самоочищению от этого вида биологической продукции.

Однако количество работ, в которых были бы комплексно исследованы различные аспекты процесса разрушения ПГА в природной среде, в целом невелико; большинство исследований выполнено в лабораторных условиях без учета всей сложности этого процесса. Вместе с тем разрушаемость ПГА зависит от многих составляющих, включая собственно химический состав и структуру полимера, микробную составляющую биоты как главного агента их биодеградации, а также условий среды, которые, в свою очередь,

определяются биологическими, гидротермическими, климатическими и погодными условиями (Прудникова, Волова, 2012). Поэтому только комплексные исследования позволяют адекватно и корректно изучить этот многофакторный процесс.

В данной статье обобщены результаты многолетних исследований закономерностей разрушения ПГА природными микробиоценозами различной структуры, находящимися в различных климатических зонах.

### Материалы и методы

Исследовали образцы ПГА в виде пленок (диаметром 30 мм, толщиной 0,08-0,12 мм) и объемных форм (диаметром 10 мм, толщиной 0,3 см), полученные из двух типов полимеров, синтезированных по технологии ИБФ СО РАН в культуре бактерий *Wautersia eutropha* ВКПМ-5786: гомополимера 3-гидроксимасляной кислоты (ПЗГБ) и сополимера 3-гидроксимасляной и 3-гидроксивалериановой кислот (ПЗГБ/ЗГВ).

Исследования выполнены в сибирских почвах в прикорневой зоне лиственных и хвойных деревьев в окрестностях г. Красноярска, в тропических почвах в районе г. Ханоя и на морском побережье г. Нячанга (Вьетнам); в морской воде – на морском испытательном стенде в бухте Дам Бай в Южно-Китайском море (г. Нячанг). Взвешенные образцы ПГА, упакованные в чехлы из мелкодисперсного мельничного газа, экспонировали в почве на глубине 5 см, в морской воде – на глубине 120 см. Длительность экспозиции составляла от 3-4 месяцев в условиях Сибири до 10-12 месяцев – в тропиках.

Показателями биоразрушения ПГА служили: убыль массы, изменение молекулярно-массовых показателей и кристалличности. Образцы в динамике наблюдения взвешивали на весах 4-го класса точности (Metler, США).

Степень кристалличности образцов исследовали на рентгеноспектрометре D8 ADVANCE (Bruker, Германия); молекулярную массу и молекулярно-массовое распределение – на хроматографе (Waters Breeze System, США) методом геле-проникающей хроматографии относительно полистироловых стандартов (Fluka, Швейцария, Германия).

Микробиологические исследования включали анализ контрольных образцов почвы или воды и соскобов с поверхности образцов ПГА. Количественное определение численности бактерий проводили высевом проб на мясопептонном агаре, грибов – на среде Сабуро и Чапека. Выделение доминантных микроорганизмов и их идентификацию проводили на основании культуральных, морфологических признаков и стандартных биохимических тестов (Определитель..., 1997; Вейант и др., 1999). Почвенные микромицеты идентифицировали по морфологическим признакам, широко используемым для определения систематической принадлежности этих микроорганизмов (Саттон и др., 2001; Watanabe et al., 2002).

Для выявления микроорганизмов – первичных деструкторов ПГА, обладающих ПГА-деполимеризующими экзоферментами, – использовали метод прозрачных зон, заключающийся в высеве проб на плотные среды, содержащие в качестве единственного источника углерода мелкодисперсный порошок ПЗГБ. Рост микроорганизмов, обладающих деполимеразной активностью, сопровождался образованием вокруг колоний характерных прозрачных зон (Mergaert et al., 1993).

Для идентификации выделенных первичных деструкторов ПГА проводили секвенирование последовательностей гена 16S рНК. ДНК выделяли с использованием набора реактивов AquaPure Genomic DNA Isolation (BioRad, США). Ген 16S рНК был амплифицирован

с использованием универсальных праймеров 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') и 1492R (5'-GGTACCTGTTACGACTT-3'), соответствующих позициям 8-27 и 1510-1492 гена *Escherichia coli*. Для эукариот амплифицировали ген 28S рНК с использованием праймеров yest D1/D2 R (5'-TTGGTCCGTGTTCAAGACG-3') и D1/D2 U (5'-GCATATCAATAAGCGGAGGA-3'). ПЦР проводили на ДНК-амплификаторе Mastercycler Gradient (Eppendorf, Германия), визуализацию и документирование – на трансиллюминаторе Doc Print (Vilber Lourmat, Франция). Образцы для определения нуклеотидной последовательности подвергали секвенированию методом Сенгера на генетическом анализаторе ABI PRISM 3100 (Applied Biosystems, США). Определенные секвенированием нуклеотидные последовательности сравнивали с гомологичными последовательностями штаммов из баз данных GenBank, EMBL и DDBJ с помощью программы NCBI BLAST (Altschul et al., 1990), выравнивая их с использованием программы ClustalX версии 2.08 (Thompson et al., 1994). Филогенетический анализ выполнен по модели Джукеса и Кантора в пакете программ TREECON v.1.3b. Найденные нуклеотидные последовательности микроорганизмов-деструкторов ПГА депонированы в базе данных GenBank (№№ HQ689679-HQ689694, HM587328-HM587333, JQ518340 – JQ518351).

## Результаты и обсуждение

### Характеристика районов исследования

Изучение биоразрушения ПГА в сибирской почве выполнено на территории дендрария Института леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН (г. Красноярск), в прикорневой зоне лиственницы сибирской (*Larix sibirica* L.) и березы повислой (*Betula*

*pendula* L.). Характерные свойства почвы дендрария – слабощелочная или близкая к нейтральной реакция гумусового горизонта ( $7,08 \pm 0,08$ ), невысокое содержание гумуса – ( $2,55 \pm 0,13$  %), полная насыщенность поглощающего комплекса основаниями (Ca и Mg), отсутствие дифференциации профиля по механическому составу, водопрочная зернистая и ореховато-зернистая структура, высокая биологическая и микробиологическая активность, значительные запасы питательных веществ (фосфора, калия и азота). Эксперименты проведены в течение двух полевых сезонов (2007 и 2010 гг.). Для первого полевого сезона характерно повышение температуры почвы от 18 до 28 °С в начальный засушливый период (июль 2007 г.) с ее постепенным падением до 8-10 °С к концу исследований (октябрь 2007 г.). Летнему сезону 2010 г. характерны предшествующая холодная зима (средняя температура минус 22,1 °С) и более низкая температура почвы (14-18 °С) в первый месяц наблюдения, с постепенным подъемом до 26 °С и последующим спадом до 13-18 °С к концу наблюдений. Влажность почвы варьировала от 10 до 30 % и в оба сезона была выше под лиственницей, чем под березой.

В тропических условиях эксперименты выполнены на климатических испытательных станциях, расположенных в двух районах: Ханое (КИС Хоа Лак) и Нячанге (КИС Дам Бай). На обеих станциях были проведены эксперименты по биоразрушению ПГА в почве (2010 г.); на КИС Дам Бай эксперимент был также проведен в морской воде, в заливе Дам Бай Южно-Китайского моря (2009 г.). Станции отличались почвенно-климатическими условиями: количество осадков на станции Хоа Лак было практически на порядок выше (среднее значение за 4 месяца с мая по август – 219,75 мм в месяц), чем на станции Дам Бай (39,2 мм), влажность почв Ханоя была

выше, а значения pH – более низкие (5,5), чем для почвы Нячанга (6,6). Динамика гидрохимических показателей морской воды в заливе Дам Бай Южно-Китайского моря в ходе наблюдаемого периода была мало подвержена изменениям. Температура воды составила в среднем  $28,7 \pm 1,6$  °С; pH воды была близкой к нейтральной (7,0-7,5); соленость воды варьировала в диапазоне от 32 до 35 ‰; концентрация растворенного кислорода – от 5,4 до 8,3 мг/л.

Микробиологические исследования выявили существенные отличия в структуре микробиоценозов в местах исследований как по общей численности, так и по составу (табл. 1).

В сибирской почве общая численность бактерий в 2007 г. составила в почве под лиственницей около  $5,1 \times 10^9$ , а под березой –  $2,2 \times 10^9$  КОЕ/г почвы. В более холодном 2010 г. эти значения были ниже –  $5,3 \times 10^7$  и  $6,8 \times 10^7$  КОЕ/г почвы соответственно. В то же время качественная картина микробиоценозов в 2007 и 2010 гг. в целом была аналогичной. Общая численность бактерий в почвах станции Хоа Лак равнялась 16 млн КОЕ/г, тогда как в почвах станции Дам Бай – около 8 млн КОЕ/г. Численность микромицетов различалась на порядок – 84 тыс. КОЕ/г почвы станции Хоа Лак и 8 тыс. КОЕ/г почвы станции Дам Бай, что может быть обусловлено более кислой реакцией почвы Ханоя по сравнению с почвой Нячанга. В морской воде численность бактерий и микромицетов была  $1,6 \times 10^3$  и  $1,0 \times 10^2$  КОЕ/мл соответственно.

#### *Кинетика биоразрушения ПГА*

Результаты исследования динамики уменьшения массы образцов в процессе биоразрушения в природных средах представлены на рис. 1.

Таблица 1. Доминирующие роды микроорганизмов в исследованных микробиоценозах

Микрофлора	Сибирь, почва (береза)	Сибирь, почва (лиственница)	Вьетнам, почва Ханоя	Вьетнам, почва Нячанга	Вьетнам, Южно-Китайское море
Бактерии	<i>Pimelobacter</i> , <i>Actinomyces</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Flavimonas</i> , <i>Mycobacterium</i> , <i>Corynebacterium</i> , <i>Arthrobacter</i>	<i>Alcaligenes</i> , <i>Aureobacterium</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Cellulomonas</i> , <i>Acinetobacter</i>	<i>Acinetobacter</i> , <i>Arthrobacter</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Brevibacillus</i> , <i>Chromobacterium</i> , <i>Cupriavidus</i> , <i>Mycobacterium</i> , <i>Ochrobactrum</i> , <i>Staphylococcus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Rhodococcus</i>	<i>Bacillus</i> , <i>Brevibacillus</i> , <i>Gordonia</i> , <i>Microbacterium</i>	<i>Pseudomonas</i> , <i>Pseudoalteromonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Corynebacterium</i> , <i>Staphylococcus</i> , <i>Planococcus</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Arthrobacter</i> , <i>Cellulomonas</i> , <i>Enterobacter</i> , <i>Gracilibacillus</i>
Микромицеты	<i>Beltrania</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Verticillium</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Hyphoderma</i> , <i>Pytium</i> , <i>Cephalosporium</i>	<i>Penicillium</i> , <i>Verticillium</i> , <i>Mucor</i> , <i>Acremonium</i>	<i>Penicillium</i> , <i>Gongronella</i> , <i>Acremonium</i> , <i>Paecilomyces</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Spicaria</i> , <i>Rhizopus</i>	<i>Penicillium</i> , <i>Gongronella</i> , <i>Rhizopus</i>	<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Verticillium</i> , <i>Mucor</i> , <i>Malbranchea</i>

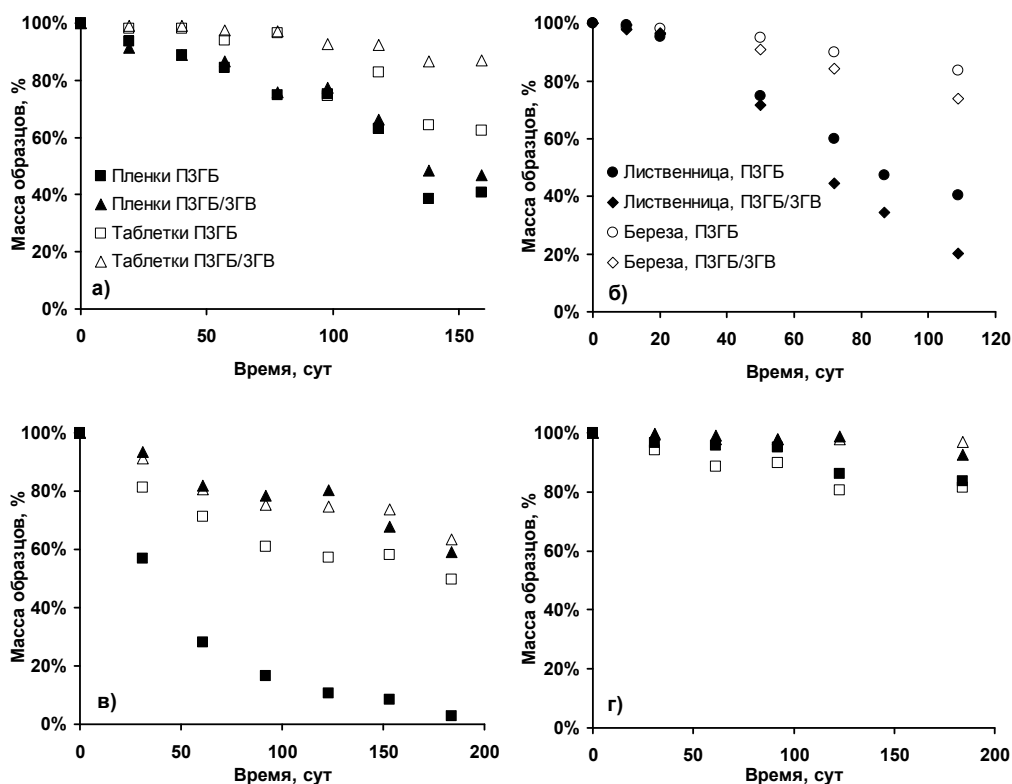


Рис. 1. Изменение массы образцов из разных типов ПГА в процессе их биоразрушения: а) морская вода, Нячанг, 2009 г.; б) почва, Красноярск, 2007 г. (пленки); в) почва, Ханой, 2010 г.; г) почва, Нячанг, 2010 г.

В морской среде (рис. 1а) зафиксировано более быстрое разрушение пленочных образцов по сравнению с объемными формами, что связано с их большей площадью поверхности относительно массы и, следовательно, с большим контактом поверхности образцов с внешней средой. Это создавало более выгодные условия для адгезии микроорганизмов и формирования ими пленок обрастания. За период наблюдения пленочные образцы из ПЗГБ и ПЗГБ/ЗГВ разрушились на 42 и 46 % от исходных значений, прессованные – на 38 и 13 % соответственно.

В почвах Сибири (рис. 1б), в более влажной и обсемененной микроорганизмами почве под лиственницей, убыль массы обоих типов ПГА происходила активнее, чем под березой. Во время полевого сезона 2007 г. снижение массы пленочных образцов из сополимера ПЗГБ/ЗГВ было значительнее по сравнению с более кристаллическими образцами из гомогенного ПЗГБ: разница для пленочных образцов составила 51 % в почве под лиственницей и 12 % – под березой. Напротив, в почвах Вьетнама (рис. 1в, г) в обоих районах исследования зафиксировано более быстрое разрушение образцов ПЗГБ по сравнению с образцами ПЗГБ/ЗГВ: на 36-38 % для почв КИС Хоа Лак и на 70-71 % – для КИС Дам Бай. При этом в почвах Хоа Лак, где количество осадков было практически на порядок выше по сравнению со станцией Дам Бай, убыль массы образцов из ПЗГБ/ЗГВ составила менее 40 %, тогда как пленки из ПЗГБ разрушились практически полностью.

*Изменение структуры  
и физико-химических свойств ПГА  
в процессе биоразрушения*

По мере биоразрушения полимерных образцов и убыли их массы изменялась морфология поверхности. Это было особенно за-

метным при анализе пленочных образцов: с увеличением количества перфораций целостность пленок нарушалась и далее происходила их дефрагментация. Изменение внешнего состояния прессованных объемных форм было менее значительным: поверхность становилась шероховатой, далее на ней формировались поры и углубления. Характерной особенностью биоразрушения образцов в данном случае было постепенное развитие глубинных повреждений образцов, внешне выражающееся в наличии потемнений, не поддающихся механическому удалению без разрушения образца.

С использованием гель-проникающей хроматографии выявлены изменения молекулярной массы образцов ПГА в процессе биodeградации (рис. 2). Для образцов, подвергшихся наибольшему разрушению в сибирских почвах (2007 г.), итоговые значения средневесовой молекулярной массы ( $M_w$ ) ПГА равнялись 81-97 % от исходной для ПЗГБ и 79-82 % – для ПЗГБ/ЗГВ. Изменения величины  $M_w$  от исходных значений у образцов, разрушавшихся в тропических почвах, были более значительными и составили в конце наблюдения: на КИС Хоа Лак – 40 % (объемные формы) и 83 % (пленки) для гомополимера, 36 % (объемные формы) и 73 % (пленки) для сополимера; на КИС Дам Бай – 36 и 77, 28 и 63 % соответственно. В морской воде молекулярная масса образцов всех типов значительно снижалась в процессе разрушения: на 43-84 % от исходной. Максимальное зарегистрированное снижение показателя (на 57 %) отмечено для объемных форм, изготовленных из сополимера; в остальных вариантах эта величина составила от 16 до 26 %. При этом значение полидисперсности во всех экспериментах повышалось, что свидетельствует о возрастании в образцах фрагментов с различной степенью полимеризуемости.

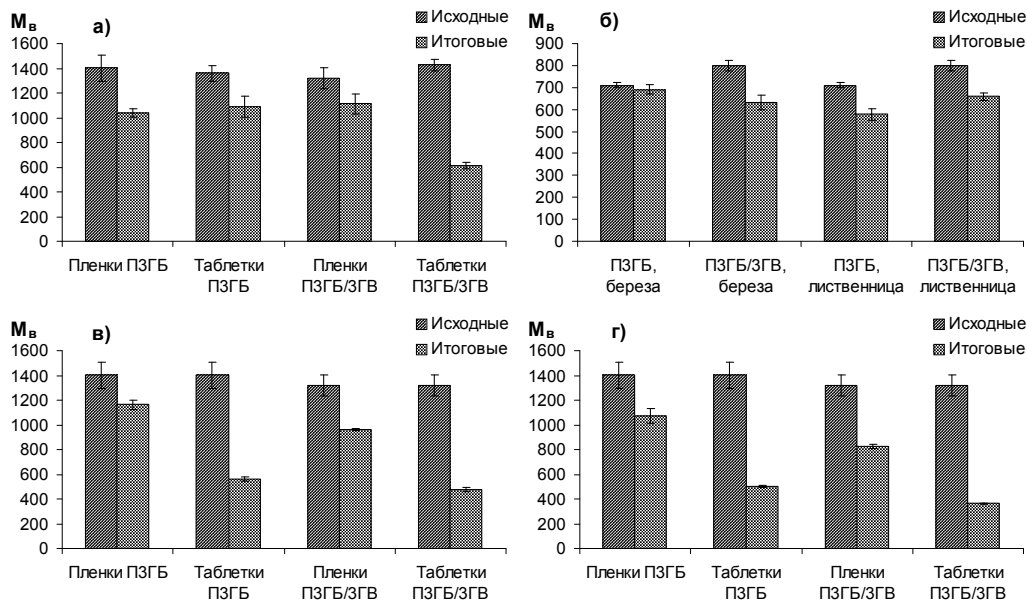


Рис. 2. Изменение средневесовой молекулярной массы ( $M_v$ ) ПГА в процессе биодеструкции образцов: а) морская вода, Нячанг, 2009 г.; б) почва, Красноярск, 2007 г. (пленки); в) почва, Ханой, 2010 г.; г) почва, Нячанг, 2010 г.

С помощью рентгеноструктурного анализа образцов ПГА обнаружено увеличение степени кристалличности полимеров обоих типов в процессе биоразрушения как в сибирских, так и во вьетнамских почвах (рис. 3). Это служит показателем предпочтительного разрушения (вымывания) аморфной фазы материала по сравнению с кристаллической в исследованных условиях в почвах. В то же время в морской воде в исследованных условиях степень кристалличности полимера достоверно не изменялась, что свидетельствует о разрушении обеих фаз – как аморфной, так и кристаллической.

Таким образом, процесс биоразрушения ПГА в природных средах, различающихся климатическими и погодными условиями, а также структурой микробиоценозов, был разным. Выявленные различия заключались не только в динамике уменьшения массы образцов, но и в механизме процесса биоразрушения, обусловленном характером взаимодей-

ствия ПГА-деполимеризующих ферментов микроорганизмов-деструкторов с собственно полимером, представленным двумя фазами – аморфной и кристаллической. Обнаруженные отличия динамики степени кристалличности ПГА, связанные с изменениями соотношения упорядоченной и неупорядоченной фаз в полимере, скорее всего, обусловлены различием ПГА-экзодеполимераз, продуцируемых микроорганизмами-деструкторами ПГА.

#### *Выявление и идентификация микробиоценозов – деструкторов ПГА, характерных для исследованных микробиоценозов*

Установлено, что на поверхности полимерных образцов формируются микробиоценозы, специфичные для конкретной природной среды, качественно и количественно отличающиеся от контрольных образцов. Среди доминантных микроорганизмов, участвующих в процессе биоразрушения ПГА в почве Си-

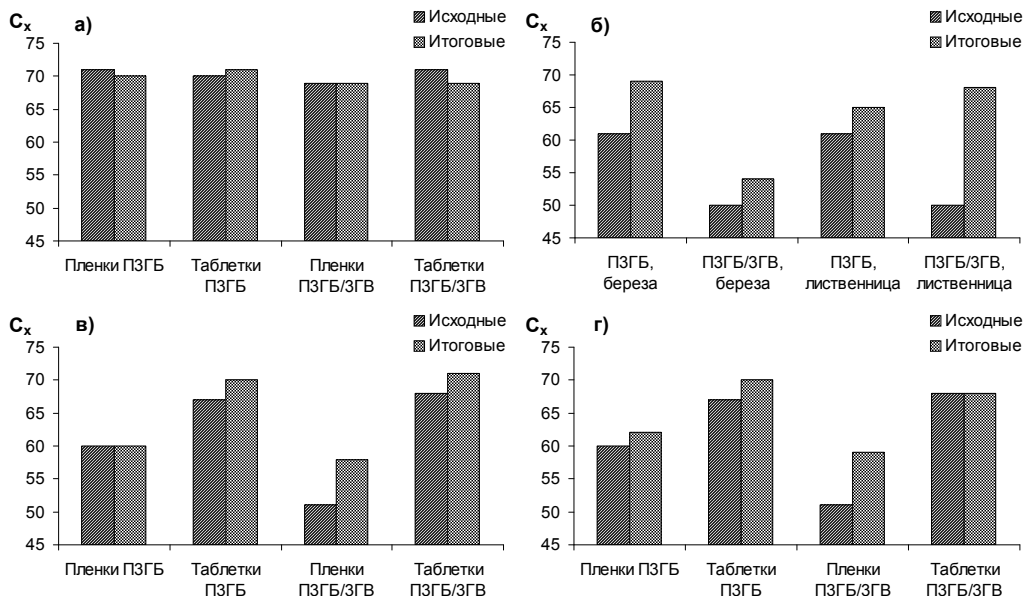


Рис. 3. Изменение кристалличности ( $C_x$ ) ПГА в процессе биодеструкции образцов: а) морская вода, Нячанг; б) почва, Красноярск, (пленки); в) почва, Ханой; г) почва, Нячанг

бири, определены бактерии р. *Agrobacterium*, *Cellulomonas*, *Alcaligenes*, *Aureobacterium*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Nocardia*, *Actinomyces*, *Pimelobacter* и грибы р. *Paecilomyces*, *Aureobasidium*, *Acremonium*, *Zygosporium*, *Penicillium*, *Verticillium*, *Nigrospora*; в тропических почвах – *Acinetobacter*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Cupriavidus*, *Mycobacterium*, *Ochrotrichum*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*; в Южно-Китайском море – бактерии р. *Pseudomonas*, *Pseudoalteromonas*, *Corynebacterium*, *Staphylococcus*, *Planococcus*, *Micrococcus*, *Arthrobacter*, *Cellulomonas*, *Enterobacter*, *Bacillus*, *Gracilibacillus*, грибы – *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Verticillium*, *Mucor*, *Malbranchea*.

С применением диагностической среды выявлены микроорганизмы – первичные деструкторы ПГА, количество которых в 10–15 раз ниже общего количества организмов, участвующих в этом процессе. Основываясь

на культуральных, морфофизиологических признаках и результатах анализа нуклеотидных последовательностей гена 16S (28S) рРНК, идентифицированы микроорганизмы, обладающие ПГА-экзополимеразами, характерные для конкретных микробиоценозов (табл. 2).

Во всех исследованных биоценозах активными деструкторами ПГА являются представители р. *Bacillus*, *Paecilomyces* и *Penicillium*, в то время как остальные микроорганизмы более специфичны для конкретной экосистемы. Доминантные деструкторы полимеров в почвах Сибири – бактерии родов *Variovorax*, *Stenotrophomonas*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus* и *Xanthomonas* и микромицеты – *Penicillium*, *Paecilomyces*, *Acremonium*, *Verticillium* и *Zygosporium*, в тропических почвах – бактерии родов *Burkholderia*, *Streptomyces*, *Nocardiopsis*, *Bacillus*, *Cupriavidus* и *Mycobacterium* и микромицеты – *Gongronella butleri*, *Penicillium*



Таблица 2. Систематическая принадлежность микроорганизмов – первичных деструкторов ПГА, выделенных из исследованных биоценозов

Микро-флора	Сибирь, почва (береза)	Сибирь, почва (лиственница)	Вьетнам, почва Ханоя	Вьетнам, почва Нячанга	Вьетнам, Южно-Китайское море
Бактерии	<i>Variovorax</i> sp., <i>Stenotrophomonas</i> sp., <i>Acinetobacter</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.	<i>Variovorax</i> sp., <i>Stenotrophomonas</i> sp., <i>Acinetobacter</i> sp., <i>Bacillus</i> sp.	<i>Burkholderia</i> * sp., <i>Streptomyces</i> sp., <i>Nocardiosis</i> sp.	<i>Burkholderia</i> sp., <i>Streptomyces</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Cupriavidus</i> sp., <i>Mycobacterium</i> sp.	<i>Enterobacter cloacae</i> , <i>Bacillus</i> sp., <i>Gracilibacillus</i> sp.
Микро-мицеты	<i>Penicillium</i> sp., <i>Paecilomyces</i> sp., <i>Verticillium</i> sp.	<i>Penicillium</i> sp., <i>Paecilomyces</i> sp., <i>Acremonium</i> sp., <i>Zygosporium</i> sp.	<i>Gongronella butleri</i> , <i>Penicillium</i> sp., <i>Acremonium recifei</i> , <i>Paecilomyces lilacinus</i> , <i>Trichoderma pseudokoningii</i>	<i>Gongronella butleri</i> , <i>Penicillium</i> sp.	<i>Malbranchea</i> sp.

\* Деструкторы, обнаруженные в двух и более регионах или экосистемах.

sp., *Acremonium recifei*, *Paecilomyces lilacinus*, *Trichoderma pseudokoningii*; в морской воде – бактерии родов *Enterobacter*, *Bacillus* и *Gracilibacillus*, микромицеты рода *Malbranchea*.

### Заключение

Впервые изучена биодegradация ПГА в микроэкосистемах, расположенных в различных регионах и климатических условиях, и установлено, что периоды, в течение которых масса полимера падает на 1/2 от исходной, могут варьировать от 127-163 суток для гомополимера до 133-220 суток для сополимера в морской воде; от 83-270 до 68-186 суток для соответствующих типов полимеров в почвах Сибири; от 16-268 суток для гомополимера до 260-380 суток для сополимера в тропических почвах. Продолжительность периодов биодegradации может существенно меняться в зависимости от численности, видовой принадлежности и физиологической активности

микроорганизмов, определяемых характеристиками природной среды, прежде всего температурным режимом и влажностью почвы, а также зависит от состава ПГА (сополимерные образцы разрушаются быстрее в сибирских почвах, гомополимерные – в тропических), метода получения и формы полимерного изделия (двумерные формы разрушаются быстрее объемных прессованных).

Отличия видового состава идентифицированных ключевых микроорганизмов-деструкторов объясняют выявленные различия разрушения ПГА: в почвах разрушение полимеров сопровождается повышением степени кристалличности как показателя преимущественного взаимодействия ПГА-экзополимераз с аморфной фазой полимера; в морской воде в условиях тропиков ферментативной атаке деполимеразами одновременно подвергаются обе фазы, кристаллическая и аморфная, поэтому степень кристалличности ПГА не изменяется.

*Работа выполнена по мегагранту (договор № 11.G34.31.0013) по Постановлению Правительства РФ № 220 от 09.04.2010 для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих учёных в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования.*

### Список литературы

Вейант Р., Мосс У., Уивер Р., Холлис Д., Джордан Дж., Кук Э., Дейншвар М. (1999) Определитель нетривиальных патогенных грамотрицательных бактерий. М.: Мир, 1784 с.

Волова Т.Г., Шишацкая Е.И. (2011) Биоразрушаемые полимеры: синтез, свойства, применение. Ред. Э. Дж. Сински. Красноярск: Красноярский писатель, 329 с.

Определитель бактерий Берджи. В 2-х т. (1997) Ред. Дж. Хоулт, Н. Криг, П. Снит, Дж. Стейли, С. Уильямс; пер. с англ. под ред. акад. РАН Г. А. Заварзина. Изд. 9-е. М.: Мир; Т.1, 432 с.; Т.2., 368 с.

Прудникова С.В., Волова Т.Г. (2012) Экологическая роль полигидроксиалканоатов – аналога синтетических пластмасс: закономерности биоразрушения в природной среде и взаимодействия с микроорганизмами. Красноярск: Красноярский писатель, 197 с.

Саттон Д. Определитель патогенных и условно патогенных грибов (2001) Ред. Д. Саттон, А. Фотергилл, М. Ринальди. М.: Мир, 468 с.

Chanprateep S. (2010) Current trends in biodegradable polyhydroxyalkanoates. J. Bioscience and Bioengineering. 6: 621-632.

Kijchavengkul T., Auras R. (2008) Perspective compostability of polymers. Polymer International. 57: 793–804.

Mergaert J., Webb A., Anderson C., Wouters A., Swings J. (1993) Microbial degradation of poly(3-hydroxybutyrate) and poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) in soils. Appl. Environ. Microbiol. 59: 3233–3238.

Moore C.A., Moore S.L., Leecaster M.K., Weisberg S.B. (2001) Comparison of plastic and plankton in the North Pacific Central Gyre. Marine Pollution Bulletin. 42: 1297-1300.

Sudesh K., Abe H., Doi Y. (2000) Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates: biological polyesters. Prog. Polym. Sci. 25: 1503–1555.

Volova T.G. (2004) Polyhydroxyalkanoates – plastic materials of the 21st century: production, properties, application. NY.: Nova Science Pub., 282 p.

Watanabe T. (2002) Pictorial atlas of soil fungi: morphologies of fungi and key species. CRC Press, 486 p.

## **Biodegradation Behavior of Polyhydroxyalkanoates on the Territory of Vietnam and Central Siberia**

**Svetlana V. Prudnikova<sup>a</sup>, Ksenia I. Korobikhina<sup>a</sup>,  
Anatoly N. Boyandin<sup>a,b</sup> and Tatiana G. Volova<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup> *Siberian Federal University,  
79 Svobodny av., Krasnoyarsk, 660041 Russia*

<sup>b</sup> *Institute of Biophysics of SB RAS,  
Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

---

*For the first time, PHA biodegradation was studied in microecosystems situated in different regions and under different climate conditions. The study showed that the time necessary for the polymer weight to decrease to a half of its initial weight, could vary significantly, depending on the number, species composition, and physiological activity of microbial communities which are determined, in particular, by the specific properties of the natural environment, temperature conditions and soil moisture. Biodegradation behavior also depends on PHA composition (PHA copolymers are degraded faster in Siberian soils while homopolymers are degraded at a higher rate in the tropical soils), production method, and the shape of the polymer device (2D specimens are degraded faster than 3D pressed ones). Differences in the species composition of the identified major PHA degrading microorganisms account for the particular PHA biodegradation behavior in different ecosystems.*

*Keywords: polyhydroxyalkanoates, biodegradation, degrading microorganisms.*

---