

# Исследование кинетики биологического разложения биопластика, полученного из крахмала тапиоки

К.Н. Корнилов, Н.Н. Роева

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

## Корреспонденция:

Корнилов Кирилл Николаевич,  
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),  
125080, Россия, г. Москва,  
Волоколамское шоссе, 11  
E-mail: kornilovkn@mgupr.ru

## Конфликт интересов:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 31.08.2023

Поступила после  
рецензирования: 27.10.2023

Принята: 01.11.2023

Copyright: © 2023 Авторы

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Исследование биологически разлагаемых пластиков, полученных из возобновляемого сырья, является актуальной проблемой современной науки.

**Цель.** Целью представленной работы является исследование проблемы замены синтетических полимеров природными, а именно изучению степени биоразлагаемости пластика из возобновляемого крахмалсодержащего сырья в лабораторных и полевых условиях.

**Материалы и методы.** Биоразлагаемый пластик был исследован методом ИК-спектроскопии, что позволило провести приблизительную оценку его химического состава и предположить, что он является композитом, содержащим в составе полимолочную кислоту (PLA). Так же в ходе работы нами были исследованы физико-химические характеристики биоразлагаемого пластика (биопласта), производимого компанией Siam Modified Starches (Тайланд) из крахмала тапиоки. В частности, разрушающее напряжение (прочность на разрыв) и относительное удлинение при разрыве определены при помощи разрывной машины РМ-50. Сделаны выводы о возможности применения этого биопласта в качестве заменителей традиционных полимеров – полиэтилена и полипропилена.

**Результаты.** Проведено комплексное исследование биоразлагаемости изделий из представленных материалов. Установлено, что они полностью биodeградируют в условиях компостирования в течение 2 месяцев. Определена скорость биodeградации в лабораторном грунте.

**Выводы.** Таким образом, нами представлены данные о степени разложения природного биопластика в опытных и полевых условиях, в результате чего было сгенерировано кинетическое уравнение биоразложения исследуемого биопластика в природных средах. В представленной работе положено начало решению проблемы замены синтетических пластиков на природные и производству упаковки на основе крахмалсодержащего сырья. Выполнена видеофиксация степени деградации новых полимерных изделий в воде и при компостировании. Установлено, что в лабораторных условиях биопластик разлагается медленно, со скоростью 0,32–0,38 % в сутки. В полевых условиях полная биodeградация полимера происходит за 2 месяца.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ИК-спектр; полимолочная кислота; биodeградируемость; биополимеры; аэробное компостирование; константа скорости; крахмал; отходы; разрыв; растяжение



Для цитирования: Корнилов, К. Н., & Роева, Н. Н. (2023). Исследование кинетики биологического разложения биопластика, полученного из крахмала тапиоки. *Health, Food & Biotechnology*, 5(3), 37–50. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i3.s175>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i3.s175>

# Study on the Biodegradation Kinetics of Bioplastic Obtained from Tapioca Starch

Kirill N. Kornilov, Nataliya N. Roeva

Russian Biotechnological University  
(BIOTECH University), Moscow, Russia

**Correspondence:**

**Kirill N. Kornilov,**  
Russian Biotechnological University,  
11, Volokolamskoe highway, Moscow,  
125080, Russia  
E-mail: [kornilovkn@mgupp.ru](mailto:kornilovkn@mgupp.ru)

**Declaration of competing interest:**  
none declared.

**Received:** 31.08.2023

**Received in revised form:** 27.10.2023

**Accepted:** 01.11.2023

**Copyright:** © 2023 The Authors

## ABSTRACT

**Introduction.** The study of biodegradable plastics, obtained from renewable raw materials, is an urgent problem of modern science.

**Purpose.** The purpose of the article is to study the problem of replacing synthetic polymers with natural ones, namely to study in laboratory and field conditions the degree of biodegradability for plastic from renewable starch-containing raw materials.

**Materials and methods.** The biodegradable plastic was examined using infrared spectroscopy, which allowed a rough assessment of its chemical composition and suggested that it was a composite containing polylactic acid (PLA). Also, in the course of our work, we studied the physicochemical characteristics of biodegradable plastic (bioplast) produced by Siam Modified Starches (Thailand) from tapioca starch. In particular, the breaking stress (tensile strength) and elongation at break were determined using a RM-50 tensile testing machine. Conclusions have been drawn about the possibility of using this bioplastic as a substitute for traditional polymers – polyethylene and polypropylene.

**Results.** A comprehensive study of the biodegradability of products, made from the presented materials, was carried out. It has been established that they completely biodegrade under composting conditions within 2 months. The rate of biodegradation in laboratory soil was determined.

**Conclusions.** Thus, we presented data on the degree of decomposition for natural bioplastic under experimental and field conditions. This investigation resulted in the generation of a kinetic equation for the biodegradation of the studied bioplastic in natural environments. The presented work marks the beginning of solving the problem of replacing synthetic plastics with natural ones and producing packaging based on starch-containing raw materials. Video recording of the degradation degree for new polymer products in water and during composting was made. It has been established that in laboratory conditions bioplastic decomposes slowly, at a rate of 0.32–0.38 % per day. Under field conditions, complete biodegradation of the polymer occurs within 2 months.

## KEYWORDS

IR spectrum; polylactic acid; biodegradability; biopolymers; aerobic composting; rate constant; starch; waste; gap; stretching



**To cite:** Kornilov, K. N., & Roeva, N. N. (2023). Study on the Biodegradation Kinetics of Bioplastic Obtained from Tapioca Starch. *Health, Food & Biotechnology*, 5(3), 37–50. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i3.s175>

## ВВЕДЕНИЕ

На кафедре Химии и экотоксикологии Российского биотехнологического университета в настоящее время проводятся крупномасштабные исследования микро- и нано частиц пластика в пищевых продуктах и объектах окружающей среды (Корнилов & Роева, 2019). Такие частицы были обнаружены нами в воде, растительных маслах (Корнилов & Роева, 2020), газированных напитках, в хлебе, и даже было установлено, что большое количество этих частиц выделяется при заваривании пирамидальных чайных пакетиков (Корнилов & Роева, 2021).

Актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена тем, что в настоящее время всё мировое научное сообщество встревожено сообщениями о появлении микро- и наночастиц синтетического пластика в пищевых продуктах и объектах окружающей среды (Al-Jaibachi, Cuthbert, & Callaghan, 2018; Sighicelli et al., 2018). Обсуждаются перспективы замены полимерных пластиков из полиэтилена, полипропилена и полиэтилентерефталата, на биопластик из крахмала. Именно поэтому возникла необходимость исследования биоразлагаемых полимеров марки Tapioplast TPS и Tapioplast C, изготовленных из крахмала тапиоки, а также изделий на их основе. Особенно важным и до нас не изученным вопросом является кинетика биоразложения упаковок из нового вида пластика, т.к. именно кинетические закономерности, а именно скорость данного процесса — является ключевой характеристикой при замене традиционных, медленно разлагающихся, полимеров (Moreno, Rodrigues, Afonso, & Jimenes, 2023).

Очевидно, что пластик как загрязнитель уже добрался до пищевых продуктов и до стола человека (Mason, Welch, & Neratko, 2018). В связи с этим замена традиционных полимеров: полиэтилена (ПЭ), полипропилена (ПП) и полиэтилентерефталата (ПЭТФ) на биоразлагаемые в настоящее время является одной из самых главных задач, стоящих перед научным сообществом (Luo et al., 2020; Luo et al., 2023).

В связи с этим к настоящему моменту нами уже был синтезирован ряд полимеров — полиамфолитов, потенциально способных поглощать микро и нано пластик из окружающей среды и очищать её. Например, синтезирован перспективный, легко синтезируемый и коммерчески доступный полимер на основе мочевины, формальдегида и глицина (Эрмуратова и др., 2022) и на основе орто-аминобензойной кислоты и эпоксидной смолы, содержащей фрагменты Бисфенола А, что делает его хорошим адсорбентом для пластиков, тоже содержащих Бисфенол А (Умирова и др., 2023).

Тем не менее важна не только очистка окружающей среды от накопившегося микро и нано пластика, но и прекращение попадания в неё нового. В связи с этим важным вопросом для всего научного сообщества в настоящее время является исследование биологически разлагаемых видов пластика, а особенно — их способности к разложению в природных условиях.

К сожалению, в русскоязычной литературе последних 5 лет не достаточно много работ на исследование биоразлагающихся пластиков, полностью полученных из возобновляемого сырья. Тогда как во всём мире эту проблему считают одной из самых актуальных, и ей уже посвящено несколько подробных обзоров (Ahsan et al., 2023; Luo et al., 2023). Существующие работы на русском языке в основном исследуют композиции на основе традиционных полимеров (полиэтилена и полипропилена) с добавкой биоразлагаемой части и наполнителей (Рогозина, 2016; Кириш, 2020). В связи с этим наша работа отчасти заполняет образовавшийся пробел по исследованию биопластов, состоящих только из возобновляемого сырья.

Для исследования биоразлагаемости пластика на основе крахмала тапиоки компания Siam Modified Starches (SMS, Тайланд) предоставила два биоразлагаемых полимера (биопласта), которые были разработаны ими ранее и в настоящее время широко применяются в производстве. Такие биопласты по информации, предоставленной компанией SMS, разлагаются в природной среде в течение двух месяцев, а значит могут заменить традиционные, не разлагаемые пластики (Роговина, 2016; Astner, Gillmore, Yingxue, & Flury, 2023).

В настоящее время считается, что биоразлагаемые пластмассы — это такие пластмассы, которые под действием живых организмов, обычно микробов, могут разлагаться на воду, углекислый газ и биомассу (Ammala, 2011). Биоразлагаемые пластмассы обычно производятся из возобновляемого сырья, микроорганизмов, продуктов нефтехимического производства или в результате комбинации всех трех источников (Nelms et al., 2018). Хотя слова «биопластик» и «биоразлагаемый пластик» похожи, они не являются синонимами. Не все биопластики (пластмассы, частично или полностью полученные из биомассы) являются биоразлагаемыми (Бабунова и др., 2018).

Биоразлагаемые пластмассы обычно используются для изготовления одноразовых предметов, таких как упаковка, посуда, столовые приборы и контейнеры для общественного питания (Chen & Patel, 2012).

В принципе, биоразлагаемые пластмассы могут заменить обычных пластмассы во многих областях их применения (Фомин, 2001). Однако это влечет за со-

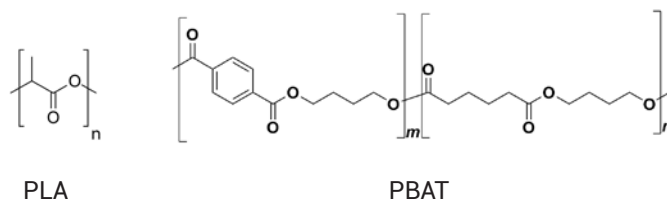
бой ряд проблем. Многие биоразлагаемые пластмассы предназначены для разложения в промышленных системах компостирования. Однако для этого требуется хорошо управляемая организация удаления отходов, чтобы это действительно происходило. Если продукты, изготовленные из биоразлагаемых пластиков, выбрасываются в обычные потоки мусора, такие как свалки, или попадают в открытую среду — реки и океаны, то потенциальные экологические выгоды не реализуются, и все имеющиеся данные свидетельствуют о том, что это может фактически ухудшить, а не уменьшить, проблему пластикового загрязнения<sup>1</sup> (Jayakala Devi & Usha, 2023).

Пластиковые предметы, помеченные как «биоразлагаемые», но которые распадаются только на более мелкие части, такие как микропластик, или на более мелкие части, которые не являются биоразлагаемыми, не являются улучшением по сравнению с обычным пластиком (Zhuzhi et al., 2022).

В частности, ещё исследование 2009 года показало, что использование биоразлагаемых пластиков является финансово целесообразным только в контексте конкретных правил, ограничивающих использование обычных пластмасс (Andrady & Neal, 2009). Например, биоразлагаемые пластиковые пакеты стали обязательными в Италии с 2011 года, когда для этого был принят специальный закон.

В настоящее время наиболее широко используются два вида биоразлагаемых пластиков (Astner, Gillmore, Yingxue, & Flury, 2023): полимолочная кислота (Polylactic

acid (PLA)) и Полибутилен адипинат терефталат (Polybutylene adipate terephthalate (PBAT)):



Однако именно на биопластики, созданные на основе крахмала, в настоящее время направлено самое пристальное внимание всего научного сообщества.

Таким образом, целью нашего исследования являлось точное установление времени биodeградации пластика на основе крахмала тапиоки, определение скорости этого процесса и построение для него кинетического уравнения, т.е. зависимости степени биodeградации от времени.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Материалы исследования

Компания Siam Modified Starches (Тайланд) к настоящему времени разработала два вида биоразлагаемых пластиков на основе крахмала из тапиоки: Tapioplast TPS (применяется для изготовления пакетов) и Tapioplast C (применяется для изготовления трубочек). Эта компания давно занимается модификацией крахмалов, о чём мы ранее уже писали в работе (Корнилов, Роева & Воронич 2020), где проводилось исследование таких

Рисунок 1

Биоразлагаемые пластики от компании SMS



<sup>1</sup> Клинков, А. С., Беляев, П. С., Однолько, В. Г., Соколов, М. В., Макеев, П. В., & Шашков, И. В. (2015). Утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов: учебное пособие. Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

крахмалов методом Лазерного Динамического Светорассеивания.

Преимущества и способы использования Тапиопластов представлены самой компанией и приведены на Рисунке 1.

Из Рисунка 1 видно, что Тапиопласты производятся именно из крахмала тапиоки, т.е. созданы на основе возобновляемого, экологически чистого ресурса. На их основе можно получать предметы из одноразового пластика, например, пакеты (Рисунок 2), которые далее полностью разлагаются в земле и мало того, могут быть использованы как удобрения:

## Рисунок 2

Маркировка на пакете из биоразлагаемого пластика



## Процедура исследования

В начале работы с целью исследования наличия в полимере характеристических групп атомов и получения общего представления о составе биопластика, нами получен его ИК-спектр. При этом ИК-спектроскопические исследования проводились на инфракрасном ИК-Фурье спектрометре Spectrum 100 (Perkin Elmers) (диапазон  $450\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ , разрешение  $4\text{ см}^{-1}$ ), оснащенного приставкой нарушенного полного внутреннего отражения и работающей с использованием программного обеспечения Spectrum One, методом помещения между двумя

пластинками из KBr. Спектрограммы были получены как среднее из трех измерений дублированных образцов после нормализации.

Далее нами были проанализированы физико-химические характеристики Тапиопластов, такие как плотность, содержание влаги, разрушающее напряжение и относительное удлинение при разрыве. Насыпная плотность, размер гранул, содержание влаги и толщина плёнки предоставлены производителем.

Определение физико-механических свойств полимеров и композиций, а именно разрушающего напряжения (прочности на разрыв) и относительного удлинения при разрыве проводилось в соответствии с ГОСТ 14236–81 «Пленки полимерные. Методы испытания на растяжение». Испытания проводили на разрывной машине РМ-50, оснащенной компьютерным интерфейсом. Предел допускаемого значения погрешности измерения нагрузки при прямом ходе не превышал  $\pm 1\%$  измеряемой нагрузки. Скорость деформации образца –  $100\text{ мм/мин}$ . Результаты представлены в Таблице 1. В виде предварительных результатов они были частично опубликованы нами ранее в сборнике докладов студенческой научной конференции (Корнилов & Алкилани, 2021)<sup>2</sup>.

Исследование биоразлагаемости изделий из Тапиопласта TPS потребовало от нас значительного времени и осуществлялось в течение более чем двух месяцев. Биоразлагаемость была изучена для готовых изделий (пакетов и коктейльных трубочек) из Тапиопласта TPS в соответствии с ГОСТ Р 57225–2016 «Пластмассы. Определение степени разложения пластмасс в имитированных условиях компостирования при лабораторных испытаниях». Согласно этому методу, экспонирование исследуемого образца в лабораторном грунте осуществляется в течение 6 месяцев при  $23\text{ °C}$ , влажности в  $80\%$  с шагом замеров физико-химических параметров в 2 недели.

Интересными работами, где рассмотрены вопросы биоповреждений различных полимерных материалов, и которые можно использовать в практической части нашего исследования, являются статьи (Пехташова и др., 2012, с. 163–166) и (Пехташова и др., 2012, с. 167–172). Здесь исследуется воздействие бактерий на полимеры и обсуждаются возможные пути разрушения полимером микроорганизмами.

Очень подробно современное состояние компостирования пластиков рассмотрено в недавно опубликованной работе (Ahsan, et al., 2023), которая подтверждает акту-

<sup>2</sup> Необходимо отметить, что изучение химического состава полимера не являлось основной целью нашего исследования. Указанный состав является коммерческой тайной компании Siam Modified Starches и раскрывать его без разрешения авторов мы не имеем права.



альность изучаемой нами темы и правильность выбранных методов исследования.

В работе (Кирш и др., 2020), написанной ранее в нашем Университете, физико-химическим параметром биоразлагаемости являлось изменение относительного удлинения при разрыве полимера до и после компостирования. Авторы полагали, что при деградации пластика ухудшаются его механические свойства и падает относительное удлинение. Мы же за параметр биоразлагаемости решили принимать не только изменение относительного удлинения, но и изменение массы готового изделия. Этот параметр мы считали более объективным и понятным. Естественно, что распад полимера должен идти с уменьшением его массы. Поэтому именно изменение массы характеризует процессы, происходящие с полимерами, как мы предполагали, наиболее наглядно.

Однако дальнейшие эксперименты показали, что по изменению массы биоразлагающегося полимера совершенно не возможно судить о кинетике и механизме протекания процесса.

Указанный ГОСТ Р 57225–2016 почти полностью соответствует Международному стандарту испытаний DIN 54900 «Проверка полимеров на способность к компостированию» (Leja & Lewandowicz, 2010). Согласно этому стандарту, биоразлагаемым считается полимер, разложившийся на 60 % в течение 6 месяцев в биокомпосте при условиях проветривания и перелопачивания в присутствии других пищевых отходов (Gumargalieva & Zaikov, 1998; Semenov, Gumargalieva & Zaikov, 2003).

Кроме изменения массы изделий мы в качестве критерия биодеструкции полимерного материала использовали также показатель изменение физико-механических свойств полимерных композиций (ГОСТ 14236) до и после компостирования. Расчет проводили по формуле:

$$\Delta E_p = [(\Delta E_{p1} - \Delta E_{p2}) / \Delta E_{p1}] \cdot 100 \%,$$

где  $\Delta E_p$  — показатель изменения относительного удлинения при разрыве в процессе компостирования, %;

$\Delta E_{p1}$  — показатель относительного удлинения при разрыве до компостирования, %: в Таблице 1 он указан равным 250 %;

$\Delta E_{p2}$  — показатель относительного удлинения при разрыве после компостирования, %.

Именно ухудшение механической прочности при биодегградации чаще всего используют для определения скорости и самого факта протекания этого процесса. В ходе биодегградации оцениваются такие свойства полимеров как деформация при растяжении, предел прочности при растяжении, относительное удлинение и модуль упругости при растяжении (Jayasekara et al., 2003).

Используя эти стандарты, мы провели испытания биоразлагаемости 4-мя независимыми методами:

- (1) компостирование в лабораторном грунте;
- (2) разложение в водной среде;
- (3) разложение путем выдерживания на открытой поверхности в природных условиях;
- (4) компостирование в полевых условиях в присутствии пищевых отходов.

Извлечение исследуемого материала из экспериментальной среды проводилось нами для первых трех методик один раз в неделю, а для методики 4 — массу определить было технически и физически не возможно, т.к. пакет содержал в себе органические продукты гниения. Важным критерием при биоразложении был так же внешний вид пакетов. Исходная масса пластиковых пакетов составляла 45,86 г, коктейльной трубочки — 1,24 г. Каждый раз определялось изменение массы по сравнению с первоначальной.

Полимер, экспонированный в лабораторном грунте, перед взвешиванием отмывался от грязи. Кроме того, перед контрольным взвешиванием все полимеры высушивались на открытом воздухе в течение 30 минут. В качестве лабораторного грунта использована земля с газона массой 10 кг, предварительно очищенная от камней и остатков растений.

Обработку результатов эксперимента проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Office, STATISTICA 6. Методы определения физико-механических свойств полимеров снабжены компьютерным интерфейсом и программами, основанными на методах статистического и сравнительного анализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

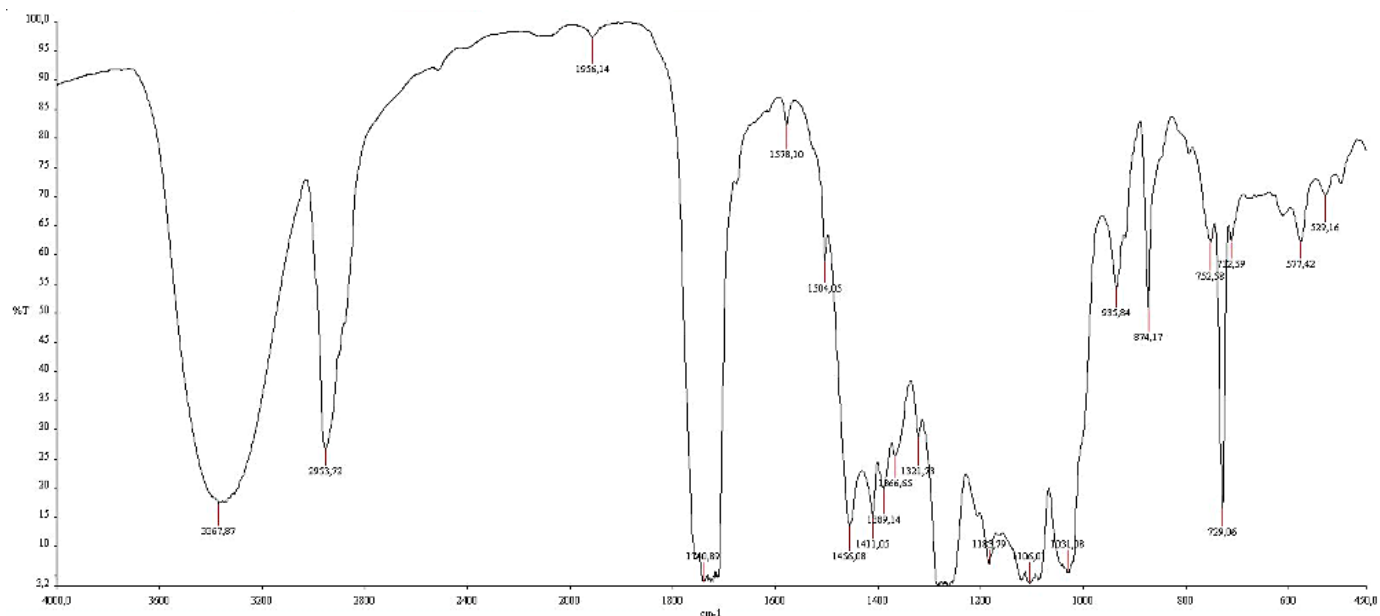
ИК-спектр исследуемого полимера выглядит следующим образом (Рисунок 3).

При исследовании ИК-спектра было зарегистрировано несколько основных пиков, волновые числа которых с расшифровкой по функциональным группам могут быть интерпретированы следующим образом (Vasac-Vocanegra et al., 2022):

- 1) уширенная полоса поглощения с центром в  $3368 \text{ см}^{-1}$  — это область поглощения, характерная для ОН-групп, связанных водородными связями; такие связи вполне характерны для крахмала, сформировавшего вторичную спиралевидную структуру;
- 2)  $2954 \text{ см}^{-1}$  — С—Н связи (как в алканах),
- 3) мощная полоса поглощения с центром в  $1741 \text{ см}^{-1}$  — валентные колебания С=О-группы,
- 4)  $1456 \text{ см}^{-1}$  — С—С связь бензольного кольца,

**Рисунок 3**

ИК-спектр биоразлагаемого полимера Tapioplast TPS на основе крахмала тапиоки



- 5)  $1256\text{--}1285\text{ см}^{-1}$  — уширенная полоса поглощения, которая может свидетельствовать о наличии нескольких сигналов колебаний C—O связи при карбонильной группе,
- 6) в области  $1031\text{ см}^{-1}$  — полоса поглощения, характерная для колебаний C—O связи простых эфиров или спиртов.

Полученные данные не позволяют достоверно раскрыть точную химическую структуру полимера. Однако очевидно, что перед нами, действительно, каким-то образом модифицированный крахмал тапиоки, в котором, возможно, в качестве наполнителя присутствует полимолочная кислота (PLA), являющаяся источником карбонильной группы на ИК-спектре. В связи с этим в качестве образца сравнения для дальнейших исследований целесообразно использовать плёнку из полимолочной кислоты.

Для определения физико-химических характеристик плёнки, полученной из биопластов методом выдувной экструзии, мы использовали образцы одноразовых пакетов, представленных компанией SMS. В качестве объектов сравнения применялись обычный полиэтиленовый пакет и биоразлагаемую плёнку из полимолочной кислоты, так же предоставленную компанией SMS.

Размер гранул, насыпная плотность и содержание влаги для полиэтилена и PLA нами не определялась, т.к. в данном случае мы работали уже с готовыми плёнками (или пакетом). Результаты исследования образцов представлены в Таблице 1:

Как видно из представленной таблицы, оба вида исследованных биоразлагаемых полимеров обладают характеристиками, которые делают их вполне пригодными для производства одноразовых изделий и для замены

**Таблица 1**

Исходные физико-химические характеристики полимеров на основе модифицированного крахмала тапиоки

|                      | Размер гранул, мм | Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup> | Содержание влаги, % | Толщина плёнки, мкм | Разрушающее напряжение, МПа | Относительное удлинение при разрыве, % |
|----------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| Tapioplast TPS       | 5                 | $0,800 \pm 0,020$                     | $4,0 \pm 0,2$       | $35 \pm 2$          | $15,0 \pm 0,5$              | $250 \pm 12$                           |
| Tapioplast C         | 5                 | $0,720 \pm 0,020$                     | $1,0 \pm 0,2$       | $30 \pm 2$          | $12,0 \pm 0,4$              | $180 \pm 11$                           |
| Полиэтилен (PE)      | —                 | —                                     | —                   | $30 \pm 2$          | $24,0 \pm 0,5$              | $397 \pm 12$                           |
| Полимолочная кислота | —                 | —                                     | —                   | $50 \pm 2$          | $15,0 \pm 0,5$              | $293 \pm 10$                           |

полиэтилена, что уже отмечено нам ранее в работе (Корнилов & Алкилани, 2021).

Перейдём к анализу результатов, полученных при компостировании исследованных образцов. В данном случае в качестве образца для сравнения так же использовалась плёнка из биоразлагаемой полимолочной кислоты (массой 20 г). Компостирование её осуществлялось только в лабораторном грунте.

Представленные изменения массы являются средним результатом трёх измерений. Погрешность значений не более 5 %.

В Таблице 3 представлены результаты изменения относительного удлинения полимера при разложении ( $\Delta E_r$  — показатель изменения относительного удлинения при разрыве в процессе компостирования, %).

При сравнении Таблиц 2 и 3 видно, что масса полимера с течением времени возрастает в течение 1,5 месяца, а потом начинает постепенно падать. Это может быть связано с тем, что сначала полимер поглощает влагу из окружающей среды (набухает), а потом начинает распадаться (растворяться) и поглощение влаги компенсируется потерей собственной массы. Механическая прочность полимера при этом стабильно и неизменно падает.

Медленнее всего полимер изменяет массу и механическую прочность при выдерживании на открытом воздухе, так как обязательным условием его биоразложения (согласно информации от производителя) является компостирование в грунте с другими органическими отходами. Одновременно с этим для наглядности нами была проведена видеофиксация постепенной деградации полимерных изделий в воде и при компостировании,

**Таблица 2**  
*Относительное изменение массы изделий из полимеров в разных средах по сравнению с первоначальной, %*  
а) пластиковый пакет (Tapioplast TPS),  $m_0 = 45,86$  г

|                           | 3 дня | 7 дней | 14 дней | 31 день | 53 дня | 63 дня | 73 дня |
|---------------------------|-------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
| в лабораторном грунте     | + 0   | +18,46 | +21,53  | +28,89  | +29,33 | +26,41 | +25,09 |
| PLA в лабораторном грунте | +0,11 | + 0,32 | +0,88   | +1,72   | +2,03  | +4,91  | +5,22  |
| в воде                    | +8,85 | +10,77 | +18,04  | +21,79  | +22,95 | +20,65 | +19,62 |
| на открытом воздухе       | -4,86 | +3,28  | +3,39   | +4,77   | +6,71  | +8,12  | +8,10  |

б) коктейльная трубочка (Tapioplast C),  $m_0 = 1,24$  г

|                       | 3 дня | 7 дней | 14 дней | 31 день | 53 дня | 63 дня |
|-----------------------|-------|--------|---------|---------|--------|--------|
| в лабораторном грунте | 0     | +0,11  | +0,12   | +0,34   | +0,42  | +0,51  |
| в воде                | 0     | +0,09  | +0,20   | +0,45   | +0,54  | +0,49  |

**Таблица 3**  
*Изменение относительного удлинения при разрыве ( $\Delta E_r$ , %) для пластикового пакета в разных средах по сравнению с первоначальной:*

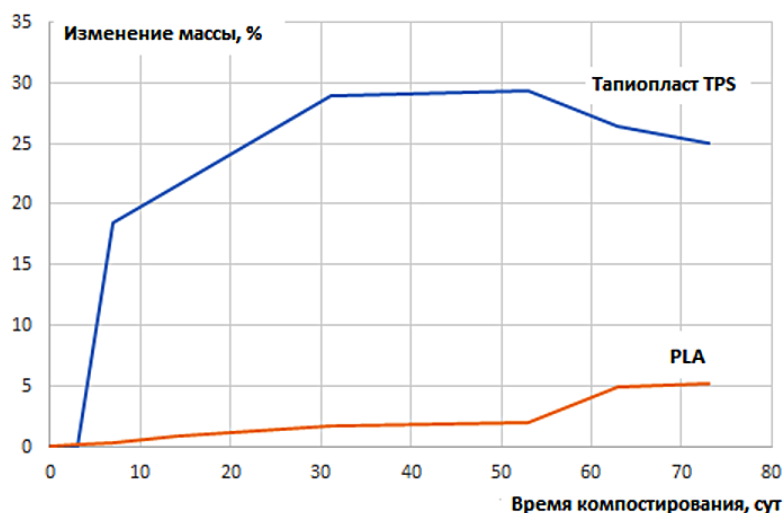
| Время компостирования, т  | 3 дня | 7 дней | 14 дней | 31 день | 53 дня | 63 дня | 73 дня |
|---------------------------|-------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
| в лабораторном грунте     | 1,0   | 3,5    | 4,8     | 10,0    | 19,1   | 23,4   | 27,5   |
| PLA в лабораторном грунте | 0,2   | 0,8    | 3,2     | 5,0     | 6,2    | 8,4    | 12,3   |
| в воде                    | 1,2   | 4,2    | 5,1     | 8,0     | 14,0   | 15,6   | 19,0   |
| на открытом воздухе       | 0     | 0,5    | 3,2     | 4,1     | 8,2    | 8,9    | 9,1    |

Примечание: погрешность значений не более 5 %.



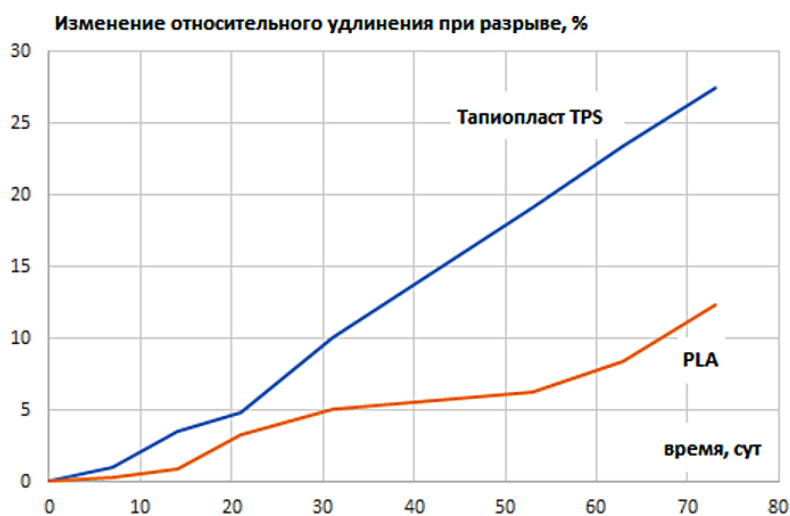
**Рисунок 4**

*Изменение массы полимера в пластиковых пакетах при биодеградаци в лабораторном грунте в зависимости от времени*



**Рисунок 5**

*Изменение относительного удлинения при разрыве (%) для пластиковых пакетов при биодеградаци в лабораторном грунте в зависимости от времени*



так как нам было важно понимать, как изменялся внешний вид и потребительские свойства изделий<sup>3</sup>.

Т.к. компостирование пакета в лабораторном грунте наиболее соответствует ГОСТу 57225, то именно для этого случая нами с целью наглядной демонстрации результатов были построены графики зависимости из-

менения массы от времени и механической прочности (относительного удлинения при разрыве) от времени (Рисунки 4 и 5):

Не трудно заметить, что согласно Таблице 2 и Рисункам 4 и 5, видимая биодеструкция в лабораторном грунте начинается не ранее, чем через 7 суток, но потом

<sup>3</sup> <https://youtu.be/Otk6Ju1PtZw>: подготовка к испытаниям, <https://youtu.be/FF590if4MLA> — вот как производитель рекомендует утилизировать свой биопластик, <https://youtu.be/UjCgJF8rcV8> — начало лабораторных испытаний, [https://youtu.be/rs\\_05Js1NWk](https://youtu.be/rs_05Js1NWk) — начало испытаний в полевых условиях, <https://youtu.be/X9fXvHvYTI> — извлечение из воды и грунта через 7 дней, <https://youtu.be/N1IU4bxTOEg> — вид полимеров через 7 дней, <https://youtu.be/JI-wA5qp268> — результаты лабораторных испытаний через 14 дней, <https://youtu.be/Wcfj9Gyq9VU> — результаты полевых испытаний через 14 дней, <https://youtu.be/e4EN5XcXWC8> — результаты лабораторных испытаний через 31 день, <https://youtu.be/tkJ5fKqug4w> — результаты полевых испытаний через 31 день.

продолжается непрерывно и неизменно. Если считать, что скорость биоразложения прямо пропорциональна скорости уменьшения механической прочности, то эту скорость можно определить как изменение относительного удлинения при разрыве из Таблицы 3, деленное на полное время, за которое это изменение произошло:

$$v = \Delta E_p / \tau.$$

Получим величину, выраженную в процентах в сутки (Таблица 4):

Из Таблицы 4 отчётливо видно, что начиная с 2 недель компостирования скорость уменьшения механической прочности, а значит, и скорость биоразложения, стабилизируется и становится равно 0,32–0,38 % в сутки.

Интересный результат был получен нами через 2 месяца испытаний. В лабораторном грунте полимер в это время начал терять массу, а механическая прочность его уменьшилась на 23 %. То есть процесс биодеградации происходил, но медленно. Одновременно с этим за те же самые 2 месяца в полевых условиях весь полимерный пакет превратился в труху — мелкие фрагменты вещества с коричневым оттенком. Большая его часть полностью сгнила и растворилась.

Отличие полевых условий от лабораторных заключалось в том, что в полевых внутри пакета находились пищевые отходы, в ходе биодеградации он подвергался воздействию бактерий, дождей, т.е. гнил вместе с органическими остатками внутри. В связи с полной биодеградацией полимера в полевых условиях, что и соответствует рекомендациям производителя, на этом эксперимент был нами закончен.

Таким образом, мы установили, что скорость биодеградации в лабораторном грунте, начиная с 2 недель эксперимента, становится постоянной. То есть ход реакции подчиняется кинетическому уравнению нулевого порядка:

$$v = k,$$

$$C = C_0 - kt,$$

где  $v$  — скорость биоразложения в %/сут,  $C$  — механическая прочность в % от первоначальной,  $C_0 = 100$  %,  $k$  — константа скорости биоразложения в %/сут, и  $t$  — время биоразложения в сутках.

$k$  средне арифметическая = 0,35 %/сут. Таким образом, итоговое кинетическое уравнение биоразложения может быть предложено в виде:

$$C = 100 - 0,35 \cdot t.$$

Период полуразложения для реакций нулевого порядка равен  $t_{0,5} = C_0 / 2k$ . И в нашем случае  $t_{0,5} = 143$  сут.

При этом ещё раз заметим, что в полевых условиях, в присутствии гниющих органических отходов, почвенных бактерий, насекомых и дождей полная биодеструкция наступает гораздо быстрее — уже за 60 суток.

Интересно отметить, что смесь крахмала с полиэтиленом подвергается биодеструкции при компостировании согласно кинетическому уравнению первого порядка (Leejarkpai et al., 2011). Это было установлено по динамике выделения углекислого газа из компоста, т.е. превращения твердого углерода в  $CO_2$ . Таким образом, можно сделать вывод, что кинетика биоразложения определяется тем параметром, который исследуется при биоразложении. В случае превращения  $C$  в  $CO_2$  мы видим механизм первого порядка, а в случае ухудшения механических свойств — механизм нулевого порядка.

Ранее в литературе уже были описаны возможные механизмы биодеградации крахмала в почве (Tang & Alavi, 2011). Микроорганизмы могут напрямую воздействовать на молекулы крахмала и целлюлозы, т.к. способны вырабатывать ферменты для деполимеризации и расщепления полимера. Это приводит к снижению молекулярной массы в присутствии микробных клеток (Vroman & Tighzert, 2009). Например, минерализация кукурузного крахмала при 58 °C занимала 44 дня в аэробных условиях (Degli-Innocenti, Tosin, & Bastioli, 1998). Было установлено, что диапазон pH 7,0–8,0 и влажность 50 % способствуют биодеградации пленок крахмала в органическом компосте, полученном из различных культур. На первой стадии разложения, в основном вызванной выщелачиванием пластификатора, в течение 24 часов было потеряно около 30 % веса. На втором этапе, главным образом из-за биологической активности и разрыва гликозидных связей, вес медленно снижался до 90 % от первоначального веса примерно за 20 дней (Torres et al., 2011). Интересно, что в нескольких статьях сообщалось о разложении смесей на основе крахмала во время компостирования (23–25 °C) и было обнаружено, что в аэроб-

**Таблица 4**

*Скорость уменьшения механической прочности биоразлагаемого пластика на основе крахмала тапиоки в пластиковых пакетах при компостировании в лабораторном грунте*

|           | 3 дня       | 7 дней      | 14 дней     | 31 день     | 53 дня      | 63 дня      | 73 дня      |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| % в сутки | 0,33 ± 0,01 | 0,50 ± 0,02 | 0,34 ± 0,02 | 0,32 ± 0,01 | 0,36 ± 0,01 | 0,37 ± 0,01 | 0,38 ± 0,01 |

ных условиях температура также играет ключевую роль в разложении биопластика (Accinelli et al., 2012). В другой работе сообщается о разложении биопластика на основе крахмала в условиях непромышленного компостирования примерно после 9 недель компостирования (Czaja-Jagielska & Melski, 2013).

Таким образом, результаты, полученные ранее другими исследователями, вполне сходятся в нашими. Кроме того, мы видим, что ранее изучена биodeградация совершенно других видов крахмала, но не биопластика на основе тапиоки. Представленная работа является серьёзным дополнением к общемировым результатам по исследованию биоразлагаемых материалов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Методом ИК-спектроскопии исследована плёнка из биоразлагаемого пластика, полученного на основе крахмала тапиоки. Определено наличие некоторых характеристических групп атомов в исследуемом полимере. Высказано предположение о наличии в композите полимолочной кислоты.
2. Исследованы физико-механические характеристики изделий на основе биоразлагаемых полимеров: разрушающее напряжение и относительное удлинение.
3. Сделан вывод о возможности применения данных биополимеров для замены полиэтилена в одноразовых изделиях.
4. Исследована биоразлагаемость готовых изделий из нового вида пластика. Установлено, что в лабора-

торных условиях при компостировании биопластик разлагается медленно, со скоростью 0,32–0,38 % в сутки. В полевых условиях полная биodeградация полимера происходит за 2 месяца.

5. Проведено сравнение скорости биоразложения полимолочной кислоты и пластика на основе крахмала тапиоки.
6. Предложено кинетическое уравнение биоразложения исследуемого биопластика.
7. Установлено, что биоразложение является процессом, подчиняющимся кинетическому уравнению нулевого порядка, в том случае, если в качестве критерия биоразложения использовать показатель изменения относительного удлинения при разрыве в процессе компостирования.

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Корнилов К.Н.:** концептуализация, разработка методологии исследования, работа с программным обеспечением; курирование данных, написание — подготовка черновика рукописи; визуализация, проведение исследования; программное обеспечение, валидация данных; написание-рецензирование и редактирование рукописи; применение статистических, математических или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования; проведение исследовательского процесса, в частности, проведение экспериментов или сбор данных / доказательств.

**Роева Н. Н.:** научное руководство исследованием.

## ЛИТЕРАТУРА

- Базунова, М. В., Бакирова, Э. Р., Базунова, А. А., Кулиш, Е. И., & Захаров, В. П. (2018). Изучение биодеструкции биоразлагаемых полимерных композитов на основе первичных и вторичных полиолефинов и природных наполнителей растительного происхождения. *Вестник Технологического университета*, 21(1), 43–46.
- Кириш, И. А., Романова, В. А., Тверитникова, И. С., Безнаева, О. В., Банникова, О. А., & Шмакова, Н. С. (2020). Исследования влияния ультразвуковой обработки на расплавы полимерных композиций на основе полиэтилена и модифицированного крахмала. *Химическая промышленность сегодня*, 1, 62–67.
- Корнилов, К. Н., & Роева, Н. Н. (2019). Определение содержания наночастиц пластика в питьевой воде и жидких пищевых продуктах. *Health, Food & Biotechnology*, 1(2). <https://doi.org/10.36107/hfb.2019.i2.s242>
- Корнилов, К. Н., & Роева, Н. Н. (2020). Обнаружение частиц микропластика в растительных маслах. *Health, Food & Biotechnology*, 2(1). <https://doi.org/10.36107/hfb.2020.i1.s315>
- Корнилов, К. Н., & Роева, Н. Н. (2021). Определение выделения частиц микропластика чайными пакетиками при заваривании. *Health, Food & Biotechnology*, 3(3). <https://doi.org/10.36107/hfb.2021.i3.s113>
- Корнилов, К. Н., Роева, Н. Н., & Воронич, С. С. (2020). Экологическая оценка качества модифицированных крахмалов методом динамического лазерного светорассеяния. *Экологические системы и приборы*, 7, 31–40. <https://doi.org/10.25791/esip.07.2020.1169>

- Корнилов, К. Н., & Алкилани, Х. (2021). Исследование физико-химических свойств новых биоразлагаемых полимеров на основе крахмала тапиоки. В *Лучшие студенческие исследования*, (с.7–11).
- Пехташева, Е. Л., Неверов, А. Н., Заиков, Г. Е., Софьина, С. Ю., & Темникова, Н. Е. (2012). Методы оценки биостойкости материалов. *Вестник Казанского технологического университета*, 8, 163–166.
- Пехташева, Е. Л., Неверов, А. Н., Заиков, Г. Е., Софьина, С. Ю., & Темникова, Н. Е. (2012). Способы защиты материалов от биоповреждений. *Вестник Казанского технологического университета*, 8, 167–172.
- Роговина, С. З. (2016). Биоразлагаемые полимерные композиции на основе синтетических и природных полимеров различных классов. *Высокомолекулярные соединения. Серия С*, 58(1), 68–80. <https://doi.org/10.7868/S2308114716010106>
- Умирова, Г. А., Тураев, Х. Х., Корнилов, К. Н., & Эрмуратова, Н. А. (2023). Исследование сорбции металлов ковалентно иммобилизованными полиамфолитами на основе аминокислот. *Известия вузов. Химия и химическая технология*, 66(5), 41–51. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236605.6728>
- Фомин, В. А. (2001). Биоразлагаемые полимеры, состояние и перспективы использования. *Пластические массы*, 2, 42.
- Эрмуратова, Н. А., Тураев, Х. Х., Корнилов, К. Н., & Роева, Н. Н. (2022). Синтез и изучение комплексобразующего сорбента на основе карбамида, формальдегида и аминокислотной кислоты при помощи ИК-спектроскопии и сканирующего электронного микроскопа. *Известия вузов. Химия и химическая технология*, 65(9), 31–38. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226509.6626>
- Accinelli, C., Saccà, M. L., Mencarelli, M., & Vicari, A. (2012). Deterioration of bioplastic carrier bags in the environment and assessment of a new recycling alternative. *Chemosphere*, 89, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.028>
- Ahsan, W. A., Hussain, A., Lin, C., & Nguyen, M. K. (2023). Biodegradation of different types of bioplastics through composting—A recent trend in green recycling. *Catalysts*, 13, 294. <https://doi.org/10.3390/catal13020294>
- Al-Jaibachi, R., Cuthbert, R. N., & Callaghan, A. (2018). Up and away: ontogenic transference as a pathway for aerial dispersal of microplastics. *Biology Letters*, 14(4), 1–4. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0479>
- Ammala, A. (2011). An overview of degradable and biodegradable polyolefins. *Progress in Polymer Science*, 36(8), 1015–1043. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.12.002>
- Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1977–1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
- Astner, A. F., Gillmore, A. B., Yingxue Yu., & Flury, M. (2023). Formation, behavior, properties and impact of micro- and nanoplastics on agricultural soil ecosystems (A Review). *NanoImpact*, 31, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2023.100474>
- Baca-Bocanegra, B., Martínez-Lapuente, L., Nogales-Bueno, J., Hernández-Hierro, J. M., & Ferrer-Gallego R. (2022). Feasibility study on the use of ATR-FTIR spectroscopy as a tool for the estimation of wine polysaccharides. *Carbohydrate Polymers*, 287, 119–365. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119365>
- Chen, G.-Q., & Patel, M. K. (2012). Plastics derived from biological sources: present and future: A technical and environmental review. *Chemical Reviews*, 112(4), 2082–2099. <https://doi.org/10.1021/cr200162d>
- Czaja-Jagielska, N., & Melski, K. (2013). Biodegradation of starch-based films in conditions of nonindustrial composting. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(4), 1039–1044.
- Degli-Innocenti, F., Tosin, M., & Bastioli, C. (1998). Evaluation of the biodegradation of starch and cellulose under controlled composting conditions. *Journal of Environmental Polymer Degradation*, 6, 197–202. <https://doi.org/10.1023/A:1021825715232>
- Gumargalieva, K. Z., & Zaikov, G. E. (1998). *Biodegradation and biodeterioration of polymers. Kinetic aspects*. Nova Science Publishing. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511550522.010>
- Jayasekara, R., Harding, I. H., Bowater, I., & Christie, G. B. Y. (2003). Biodegradation by Composting of Surface Modified Starch and PVA Blended Films. *Journal of Polymers and the Environment*, 11, 49–56. <https://doi.org/10.1023/A:1024219821633>
- Jayakala Devi, R., & Usha, R. (2023). Microbial approaches for the plastic bioremediation and ecofriendly environmental sustainability. *Asian Journal of Chemistry*, 35(2), 289–300. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2023.26928>
- Leja, K. & Lewandowicz, G. (2010). Polymer biodegradation and biodegradable polymers—A review. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19, 255–266.
- Leejarkpai, T., Suwanmanee, U., Rudeekit, Yo., & Mungcharoen, Th. (2011). Biodegradable kinetics of plastics under controlled composting conditions. *Waste Management*, 31, 6, 1153–1161. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.12.011>
- Luo, H., Zhao, Y., Li, Y., Xiang, Y., He, D., & Pan, X. (2020). Aging of microplastics affects their surface properties, thermal decomposition, additives leaching and interactions in simulated fluids. *Science of the Total Environment*, 714, 136862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136862>
- Luo, H., Chaolin, T., Dongqin, H., Anping, Zh., Jianqiang S., Jun Li, Juan Xu, & Pan, X. (2023). Interactions between microplastics and contaminants: A review focusing on the effect of aging process. *Science of the Total Environment*, 899, 165615, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165615>
- Mason, S., Welch, V., & Neratko, J. (2018). *Synthetic polymer contamination in bottled water*. Fredonia State University. <https://dx.doi.org/10.3389%2Ffchem.2018.00407>
- Moreno, B. B., Rodrigues, B. V., Afonso, L. R., & Jimenes, Ch. P. (2023). High incidence of false biodegradability claims related



- to single-use plastic utensils sold in Brazil. *Sustainable Production and Consumption*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.024>
- Nelms, S. E., Galloway, T. S., Godley, B. J., Jarvis, D. S., & Lindeque, P. K. (2018). Investigating microplastic trophic transfer in marine top predators. *Environmental Pollution*, 238, 999–1007. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.016>
- Sighicelli, M., Lietrelli, L., Lecce, F., Iannilli, V., Falconieri, M., Coscia, L., Di Vito, S., Nuglio, S. & Zampetti, G. (2018). Microplastic pollution in the surface waters of Italian subalpine lakes. *Environmental Pollution*, 236, 645–651. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29433105>
- Semenov, S. A., Gumargalieva, K. Z., & Zaikov, G. E. (2003). *Biodegradation and durability of materials under the effect of microorganisms*. VSP International Science Publishing. <https://doi.org/10.1201/b11980>
- Tang, X., Alavi, S. (2011). Recent advances in starch, polyvinyl alcohol based polymer blends, nanocomposites and their biodegradability. *Carbohydrate Polymers*, 85, 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.01.030>
- Torres, F., Troncoso, O., Torres, C., Díaz, D., & Amaya, E. (2011). Biodegradability and mechanical properties of starch films from Andean crops. *International Journal of Biological Macromolecules*, 48, 603–606. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2011.01.026>
- Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). Biodegradable polymers. *Materials*, 2, 307–344. <https://doi.org/10.3390/ma2020307>
- Zhuozhi, Ch., Rongdi D., Yunjie, X., & Yi Wei (2022). Biodegradation of highly crystallized poly(ethylene terephthalate) through cell surface codisplay of bacterial PETase and hydrophobin. *Nature Communications*, 13(1), 7138. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34908-z>
- ## REFERENCES
- Bazunova, M. V., Bakirova, E. R., Bazunova, A. A., Kulish, E. I., & Zakharov, V. P. (2018). Study of the biodegradation of biodegradable polymer composites based on primary and secondary polyolefins and natural fillers of plant origin. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 21(1), 43–46.
- Kirsh, I. A., Romanova, V. A., Tveritnikova, I. S., Beznaeva, O. V., Bannikova, O. A., & Shmakova, N. S. (2020). Research on the influence of ultrasonic treatment on melts of polymer compositions based on polyethylene and modified starch. *Himicheskaya promyshlennost' segodnya*, 1, 62–67.
- Kornilov, K. N., & Roeva, N. N. (2019). Determination of the content of plastic nanoparticles in drinking water and liquid food products. *Health, Food & Biotechnology*, 1(2). <https://doi.org/10.36107/hfb.2019.i2.s242>
- Kornilov, K. N., & Roeva, N. N. (2020). Detection of microplastic particles in vegetable oils. *Health, Food & Biotechnology*, 2(1). <https://doi.org/10.36107/hfb.2020.i1.s315>
- Kornilov, K. N., & Roeva, N. N. (2021). Determination of release of microplastic particles from tea bags during brewing. *Health, Food & Biotechnology*, 3(3). <https://doi.org/10.36107/hfb.2021.i3.s113>
- Kornilov, K. N., Roeva, N. N., & Voronich, S. S. (2020). Environmental assessment of the quality of modified starches using dynamic laser light scattering. *Ekologicheskie sistemy i pribory*, 7, 31–40. <https://doi.org/10.25791/esip.07.2020.1169>
- Kornilov, K. N., & Alkilani, H. (2021). Study of the physicochemical properties of new biodegradable polymers based on tapioca starch. In *Luchshie studentcheskie issledovaniya* [Best Student Research], (pp. 7–11).
- Pekhtasheva, E. L., Neverov, A. N., Zaikov, G. E., Sofina, S. Yu., & Temnikova, N. E. (2012). Methods for assessing the biostability of materials. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 8, 163–166.
- Pekhtasheva, E. L., Neverov, A. N., Zaikov, G. E., Sofina, S. Yu., & Temnikova, N. E. (2012). Methods for protecting materials from biodamage. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 8, 167–172.
- Rogovina, S. Z. (2016). Biodegradable polymer compositions based on synthetic and natural polymers of various classes. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya S*, 58(1), 68–80. <https://doi.org/10.7868/S2308114716010106>
- Umirova, G. A., Turaev, Kh. Kh., Kornilov, K. N., & Ermuratova, N. A. (2023). Study of the sorption of metals by covalently immobilized polyampholytes based on amino acids. *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya*, 66(5), 41–51. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236605.6728>
- Fomin, V. A. (2001). Biodegradable polymers, status and prospects for use. *Plasticheskie massy*, 2, 42.
- Ermuratova, N. A., Turaev, Kh. X., Kornilov, K. N., & Roeva, N. N. (2022). Synthesis and study of a complexing sorbent based on urea, formaldehyde and aminoacetic acid using IR spectroscopy and a scanning electron microscope. *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya*, 65(9), 31–38. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226509.6626>
- Accinelli, C., Saccà, M. L., Mencarelli, M., & Vicari, A. (2012). Deterioration of bioplastic carrier bags in the environment and assessment of a new recycling alternative. *Chemosphere*, 89, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.028>
- Ahsan, W. A., Hussain, A., Lin, C., & Nguyen, M. K. (2023). Biodegradation of different types of bioplastics through composting—A recent trend in green recycling. *Catalysts*, 13, 294. <https://doi.org/10.3390/catal13020294>



- Al-Jaibachi, R., Cuthbert, R. N., & Callaghan, A. (2018). Up and away: ontogenic transference as a pathway for aerial dispersal of microplastics. *Biology Letters*, 14(4), 1–4. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0479>
- Ammala, A. (2011). An overview of degradable and biodegradable polyolefins. *Progress in Polymer Science*, 36(8), 1015–1043. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.12.002>.
- Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1977–1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>.
- Astner, A. F., Gillmore, A. B., Yingxue Yu., & Flury, M. (2023). Formation, behavior, properties and impact of micro- and nanoplastics on agricultural soil ecosystems (A Review). *NanoImpact*, 31, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.nanoimpact.2023.100474>
- Baca-Bocanegra, B., Martínez-Lapuente, L., Nogales-Bueno, J., Hernández-Hierro, J. M., & Ferrer-Gallego R. (2022). Feasibility study on the use of ATR-FTIR spectroscopy as a tool for the estimation of wine polysaccharides. *Carbohydrate Polymers*, 287, 119–365. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119365>.
- Chen, G.-Q., & Patel, M. K. (2012). Plastics derived from biological sources: present and future: A technical and environmental review. *Chemical Reviews*, 112(4), 2082–2099. <https://doi.org/10.1021/cr200162d>.
- Czaja-Jagielska, N., & Melski, K. (2013). Biodegradation of starch-based films in conditions of nonindustrial composting. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(4), 1039–1044.
- Degli-Innocenti, F., Tosin, M., & Bastioli, C. (1998). Evaluation of the biodegradation of starch and cellulose under controlled composting conditions. *Journal of Environmental Polymer Degradation*, 6, 197–202. <https://doi.org/10.1023/A:1021825715232>
- Gumargalieva, K. Z., & Zaikov, G. E. (1998). *Biodegradation and biodeterioration of polymers. Kinetical aspects*. Nova Science Publishing. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511550522.010>
- Jayasekara, R., Harding, I. H., Bowater, I., & Christie, G. B. Y. (2003). Biodegradation by Composting of Surface Modified Starch and PVA Blended Films. *Journal of Polymers and the Environment*, 11, 49–56. <https://doi.org/10.1023/A:1024219821633>
- Jayakala Devi, R., & Usha, R. (2023). Microbial approaches for the plastic bioremediation and ecofriendly environmental sustainability. *Asian Journal of Chemistry*, 35(2), 289–300. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2023.26928>
- Leja, K. & Lewandowicz, G. (2010). Polymer biodegradation and biodegradable polymers—A review. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19, 255–266. Leejarkpai, T., Suwanmanee, U., Rudeekit, Yo., & Mungcharoen, Th. (2011). Biodegradable kinetics of plastics under controlled composting conditions. *Waste Management*, 31, 6, 1153–1161. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.12.011>
- Luo, H., Zhao, Y., Li, Y., Xiang, Y., He, D., & Pan, X. (2020). Aging of microplastics affects their surface properties, thermal decomposition, additives leaching and interactions in simulated fluids. *Science of the Total Environment*, 714, 136862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136862>
- Luo, H., Chaolin, T., Dongqin, H., Anping, Zh., Jianqiang S., Jun Li, Juan Xu, & Pan, X. (2023). Interactions between microplastics and contaminants: A review focusing on the effect of aging process. *Science of the Total Environment*, 899, 165615, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165615>
- Mason, S., Welch, V., & Neratko, J. (2018). *Synthetic polymer contamination in bottled water*. Fredonia State University. <https://dx.doi.org/10.3389%2Ffchem.2018.00407>
- Moreno, B. B., Rodrigues, B. V., Afonso, L. R., & Jimenes, Ch. P. (2023). High incidence of false biodegradability claims related to single-use plastic utensils sold in Brazil. *Sustainable Production and Consumption*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.024>
- Nelms, S. E., Galloway, T. S., Godley, B. J., Jarvis, D. S., & Lindeque, P. K. (2018). Investigating microplastic trophic transfer in marine top predators. *Environmental Pollution*, 238, 999–1007. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.016>
- Sighicelli, M., Lietrelli, L., Lecce, F., Iannilli, V., Falconieri, M., Coscia, L., Di Vito, S., Nuglio, S. & Zampetti, G. (2018). Microplastic pollution in the surface waters of Italian subalpine lakes. *Environmental Pollution*, 236, 645–651. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29433105>
- Semenov, S. A., Gumargalieva, K. Z., & Zaikov, G. E. (2003). *Biodegradation and durability of materials under the effect of microorganisms*. VSP International Science Publishing. <https://doi.org/10.1201/b11980>
- Tang, X., Alavi, S. (2011). Recent advances in starch, polyvinyl alcohol based polymer blends, nanocomposites and their biodegradability. *Carbohydrate Polymers*, 85, 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.01.030>
- Torres, F., Troncoso, O., Torres, C., Díaz, D., & Amaya, E. (2011). Biodegradability and mechanical properties of starch films from Andean crops. *International Journal of Biological Macromolecules*, 48, 603–606. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2011.01.026>
- Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). Biodegradable polymers. *Materials*, 2, 307–344. <https://doi.org/10.3390/ma2020307>
- Zhuozhi, Ch., Rongdi D., Yunjie, X., & Yi Wei (2022). Biodegradation of highly crystallized poly(ethylene terephthalate) through cell surface codisplay of bacterial PETase and hydrophobin. *Nature Communications*, 13(1), 7138. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34908-z>