

Синтез и переработка полимеров и композитов на их основе
Synthesis and processing of polymers and polymeric composites

УДК 678

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-2-212-225>

EDN CDZRGI



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Структура, свойства и фотодеструкция полимерных биокомпозиционных материалов на основе полилактида, наполненного термопластичным компаундом A-Len[®]

И.Ю. Васильев^{1,✉}, В.С. Петренко¹, В.А. Род¹, Д.А. Голобоков²

¹ Московский политехнический университет (Мосполитех), Москва, 107023 Россия

² Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук, Москва, 117393 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: iljanaras@ya.ru

Аннотация

Цели. Изучить влияние рецептурно-технологических параметров полимерных биокомпозиционных материалов на основе полилактида (ПЛА), наполненного термопластичным компаундом A-Len[®] (ALen), на структурные, теплофизические и деформационно-прочностные свойства, а также определить механизм деструкции под действием ультрафиолетового излучения.

Методы. В работе исследовали пленки на основе ПЛА и ALen, а также полимерные композиции на основе ПЛА и ALen (ПЛА/ALen), которые получали на плоскошелевом экструдере фирмы «МашиПласт» (Россия). Для вышеуказанных объектов определяли структурно-морфологические свойства на сканирующем электронном микроскопе JCM-6000 PLUS (JEOL, Акисима, Токио, Япония), теплофизические свойства на калориметре DSC 204 F1 (NETZSCH, Германия). Химический состав, а также определение механизма деструкции осуществляли методом инфракрасной спектроскопии на приборе ФСМ-1201 (Россия) с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения. Деформационно-прочностные свойства исследовали на разрывной машине Z010 ZwickRoell (Германия). Воздействие ультрафиолетового излучения определяли с помощью ультрафиолетовой камеры.

Результаты. Показано, что ALen в смесях с ПЛА влияет на образование гетерогенной структуры вследствие наличия в его составе полиэтилена (ПЭ). Этим опосредовано снижение модуля упругости на 34% (1050 МПа) в сравнении с исходной величиной ПЛА — 1600 МПа. При этом для фазы ПЛА в полимерных композициях осуществляется перекристаллизация с более плотным упорядочиванием надмолекулярной структуры, а для фазы ПЭ происходит снижение сегментальной подвижности макромолекул и затруднение процесса кристаллизации вследствие их разной полярности с формированием границы раздела фаз между исследуемыми компонентами.

Выводы. Механизм фотодеструкции полимерных композиций ПЛА/ALen осуществляется за счет наличия в составе термопластичного компаунда прооксидантной добавки, инициирующей процесс окисления, после чего происходит разрушение низкомолекулярной фракции ПЭ с последующей ее фрагментацией. Наряду с этим, фотодеструкция матрицы ПЛА протекает по механизму Норриша II, заключающемся в окислении полимерных цепей по радикальному типу с образованием С=С-связи. Таким образом, разработанные биокомпозиционные полимерные материалы являются перспективными для изготовления полимерных изделий из них, характеризуются оптимальными эксплуатационными свойствами и ускоренной кинетикой фотохимической деструкции.

Ключевые слова

полилактид, A-Len[®], компаунд, биокомпозиты, УФ-излучение, фотодеструкция

Поступила: 11.08.2025

Доработана: 20.11.2025

Принята в печать: 13.02.2026

Для цитирования

Васильев И.Ю., Петренко В.С., Род В.А., Голобоков Д.А. Структура, свойства и фотодеструкция полимерных биокomпозиционных материалов на основе полилактида, наполненного термопластичным компаундом A-Len®. *Тонкие химические технологии*. 2026;21(2):212–225. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-2-212-225>

RESEARCH ARTICLE

Structure, properties, and photodegradation of polymer biocomposites based on polylactide filled with A-Len® thermoplastic compound

Ilya Yu. Vasilyev¹✉, Victoria S. Petrenko¹, Viktor A. Rod¹, Dmitrii A. Golobokov²

¹ *Moscow Polytechnic University (Mospolitech), Moscow, 107023 Russia*

² *Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117393 Russia*

✉ *Corresponding author, e-mail: iljanaras@ya.ru*

Abstract

Objectives. The work set out to investigate the influence of the compounding and technological parameters of polymer biocomposite materials based on polylactide (PLA) filled with the A-Len® thermoplastic compound (Alen) on their structural, thermophysical, and mechanical properties, as well as to determine the mechanism of their destruction under the impact of ultraviolet radiation.

Methods. Films of PLA and Alen, as well as polymer composites based on them (PLA/Alen), were obtained using a flat die extruder (*MashPlast*, Russia). The structural and morphological properties of the films were determined with a JCM-6000 PLUS scanning electron microscope (*JEOL*, Akishima, Tokyo, Japan); their thermal properties were obtained using a DSC 204 F1 calorimeter (*NETZSCH*, Germany). The chemical composition and degradation mechanism were analyzed by infrared spectroscopy with an FSM-1201 spectrometer (Russia) fitted with an attenuated total internal reflection attachment. The mechanical properties were examined using a Z010 ZwickRoell tensile testing machine (*Zwick Roell Group*, Germany). The effect of ultraviolet radiation was assessed using an ultraviolet chamber.

Results. It was shown that the presence of Alen in mixtures with PLA affects the formation of a heterogeneous structure due to the presence of polyethylene in the Alen composition. This mediated a reduction in Young's modulus by 34% (to 1050 MPa) in comparison with the initial value for PLA (1600 MPa). In the polymer composites, the PLA phase recrystallizes to yield a denser-ordered supramolecular structure, while in the polyethylene phase, the segmental mobility of macromolecules decreases and crystallization process is hindered by their different polarities to form an interface between the components under study.

Conclusions. The photodegradation mechanism in PLA/Alen polymer composites is shown to be primarily due to the presence of a prooxidant additive in Alen, which initiates the oxidation process to degrade and subsequently fragment the low-molecular fraction of polyethylene. In addition, the PLA matrix photodegrades through the Norrish Type II mechanism, which describes the oxidation of polymer chains by a radical mechanism to produce C=C bonds. The developed polymer composites are promising for the fabrication of certain polymer products due to their optimal performance characteristics and accelerated photochemical degradation kinetics.

Keywords

polylactide, A-Len®, compound, biocomposites, UV radiation, photodegradation

Submitted: 11.08.2025

Revised: 20.11.2025

Accepted: 13.02.2026

For citation

Vasilyev I.Yu., Petrenko V.S., Rod V.A., Golobokov D.A. Structure, properties, and photodegradation of polymer biocomposites based on polylactide filled with A-Len® thermoplastic compound. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2026;21(2):212–225. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-2-212-225>

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающая актуальность использования биоразлагаемых полимеров вызвана возможностью создания перспективных экологически безопасных материалов для снижения экологической нагрузки с возможностью применения в упаковочной, медицинской и сельскохозяйственной отраслях [1]. Лидирующие позиции синтетических термопластов и устойчивое их развитие в упаковочной индустрии сопряжены с неконтролируемым количеством полимерных отходов, основная масса которых загрязняет окружающую среду, накапливаясь на полигонах. В подавляющем большинстве случаев для придания свойства биоразлагаемости полимеры, синтезируемые из нефтехимического сырья [2–4], модифицируют наполнителями природного происхождения.

В качестве модифицирующих добавок используют крахмал [5], хитин [6], хитозан [7] и другие природные полимеры [8–10]. Модифицирование синтетических полиолефинов полимерами природного происхождения ускоряет процесс фрагментации полимераматрицы, за счет быстрого биоразложения наполнителя. Однако процесс формирования таких композитов может быть затруднен, что связано с недостаточной адгезией синтетической матрицы к наполнителю природного происхождения. Дополнительным осложняющим фактором является максимальная концентрация наполнителя (чаще всего до 30 мас. %), что связано с технологической сложностью получения дисперсно-наполненных систем. Увеличение содержания природного полимера в матрице синтетического полимера свыше 30 мас. % приводит к формированию большого количества агломератов, что влияет на образование дефектов при их производстве [11–13].

В последние годы актуальным является создание биоразлагаемых материалов на основе полимеров, синтезируемых из возобновляемого сырья, в частности, полилактида (ПЛА), что снижает зависимость от полимеров, получаемых из нефти [14–16]. ПЛА — это синтетический полимер, мономер которого — лактид — может существовать в двух оптически активных изомерных формах: L- и D-лактид, а также в оптически неактивной: мезо-лактид. ПЛА является прочным и жестким полимером, по эксплуатационным свойствам сопоставим с полиэтилентерефталатом, при соответствующей пластификации сопоставим с полиэтиленом (ПЭ) и поливинилхлоридом [17]. ПЛА возможно перерабатывать как экструзией, получая гибкие пленки, так и термоформованием, изготавливая жесткую тару [18]. Несмотря на то, что ПЛА является биоразлагаемым полимером, важно отметить, что его биоразложение протекает при определенных условиях (высокая температура,

pH и влажность среды). В связи с этим ПЛА, так же как и другие полимеры, модифицируют добавками различного происхождения [19–21], при этом не всегда удается достичь заданных свойств в виду низкой их технологической совместимости [22].

Еще одним способом модифицирования синтетических термопластов является использование прооксидантных добавок, представляющих собой стеараты переходных металлов (Mn, Fe, Mg), инициирующих разложение полимерной матрицы и способствующих ускоренной окислительной деструкции [23]. Преимущество использования стеаратов переходных металлов связано с возможностью модифицирования широкого ряда термопластичных полимеров, в том числе и ПЛА, переработкой на существующем оборудовании, предназначенном для термопластов, низкой их токсичностью и непродолжительным сроком окислительной деструкции полимерных материалов при невысоком их массовом содержании в объеме синтетического полимера, в отличие от природных наполнителей [24].

Таким образом, представляет научно-практический интерес проанализировать свойства тройных композиций на основе ПЛА, наполненного термопластичным компаундом A-Len[®] (Alen) с определением механизма их деструкции, что в настоящее время разработано недостаточно и требует дальнейшего изучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

В качестве полимерной матрицы для изготовления полимерных композиций использовали алифатический полиэфир — ПЛА марки 524 (Китай). В качестве добавки, инициирующей деструкцию полимерной матрицы, использовали термопластичный компаунд торговой марки A-Len[®] TECH BD00TY (Индия) с содержанием действующего (органического) вещества 10 мас. %. В табл. 1 приведены характеристики исходных компонентов.

Методы исследования

Смешение компонентов, пластицирование и последующий отлив полимерных композиций осуществляли на плоскощелевом экструдере фирмы «МаулПласт» (Россия), варьируя содержание Alen от 5 до 20 мас. % в смесях с ПЛА. На выходе получали полимерные композиции в виде пленок толщиной 60 ± 3 мкм. Температурные режимы получения исходных пленок ПЛА и Alen, а также полимерных композиций на их основе представлены в табл. 2. Составы полимерных композиций представлены в табл. 3.

Таблица 1. Характеристики исходных компонентов

Table 1. Characteristics of the initial components

Компонент Component	Показатель текучести расплава (ПТР), г/10 мин Melt flow index (MFI), g/10 min	Модуль упругости, МПа Young's modulus, MPa	Относительное удлинение при разрыве, % Elongation at break, %	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³
ПЛА Polylactide (PLA)	8.7	1600	4.2	1.24
Alen	17	600	3.2	0.97

Таблица 2. Температурные режимы получения полимерных композиций

Table 2. Temperature conditions to produce polymer composites

Полимерная композиция Polymer composites	Температурные режимы зон плоскощелевого экструдера, °С Temperature conditions of flat die extruder zones, °C				
	1 зона Zone 1	2 зона Zone 2	3 зона Zone 3	4 зона Zone 4	5 зона Zone 5
ПЛА PLA	165	168	170	173	175
Alen	120	125	130	135	140
ПЛА/Alen PLA/Alen	165	168	170	173	175

Таблица 3. Состав полимерных композиций

Table 3. Compositions of polymer composites

Состав полимерных композиций Polymer composites	Концентрация, мас. % Concentration, wt %	
	ПЛА PLA	Alen
ПЛА PLA	100	–
Alen	–	100
ПЛА/Alen5 PLA/Alen5	95	5
ПЛА/Alen10 PLA/Alen10	90	10
ПЛА/Alen15 PLA/Alen15	85	15
ПЛА/Alen20 PLA/Alen20	80	20

Воздействие ультрафиолетового (УФ) излучения на образцы определяли с помощью УФ-камеры, внутри которой размещены две кварцевые (ртутные) лампы PRK-4, обеспечивающие излучение с длиной волны $\lambda = 254$ нм. Изолированные от внешнего источника излучения образцы пленки 150×150 мм размещали на расстоянии 30 см от УФ-ламп и экспонировали в течение 150 ч с выборкой контрольных образцов через каждые 25 ч.

Теплофизические свойства образцов определяли с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии, на калориметре DSC 204 F1 (NETZSCH, Германия) в интервале температур от 20 до 200°C со скоростью сканирования 10°C/мин и навеске образца 10 ± 1 мг в токе инертного газа — аргона. Исследуя теплофизические свойства, определяли энтальпию плавления ΔH_m (Дж/г), температуру плавления T_m (°C), температуру стеклования T_g (°C). Для определения степени кристалличности α (%) Alen и ПЛА, а также полимерных композиций на их основе, использовали энтальпию плавления полностью кристаллического ПЭ, равную 293 Дж/г, а также ПЛА — 93.7 Дж/г согласно ISO 11357-1:2023 «Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Общие принципы».¹

Для идентификации химического состава, а также определения механизма фотодеструкции, использовали метод ИК-Фурье спектроскопии с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения на приборе ФСМ-1201 (Россия), с разрешением в 1.0 см^{-1} (спектральный диапазон волновых чисел $4000\text{--}375 \text{ см}^{-1}$) при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ по ГОСТ 57939-2017².

Эксплуатационные свойства определяли в соответствии с ISO 527-3:2018 «Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении»³. Испытания

¹ ISO 11357-1:2023. Plastics — Differential scanning calorimetry (DSC). Part 1: General principles. <https://www.iso.org/standard/83904.html>. Дата обращения 22.01.2026. / Accessed January 22, 2026.

² ГОСТ 57939-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Композиты полимерные. Инфракрасная спектроскопия. Общие принципы. М.: Стандартинформ; 2019. [GOST 57939-2017. National Standard of the Russian Federation. Polymer composites. Infrared spectroscopy. General principles. Moscow: Standartinform; 2019.]

³ ISO 527-3:2018. Plastics — Determination of tensile properties. Part 3: Test conditions for films and sheets. <https://www.iso.org/standard/70307.html>. Дата обращения 22.01.2026. / Accessed January 22, 2026.

проводили на разрывной машине Z010 ZwickRoell (Zwick Roell Group, Германия). Образцы для исследования деформационно-прочностных свойств получали с помощью вырубного устройства в соответствии с типом 1B (EN ISO 527-3:2018) и размерами 50 × 10 мм. Предел допустимого значения погрешности измерения нагрузки не превышал 1%. Предельное отклонение по ширине образца составило ±0.1 мм. Среднее значение определяли по 10 измерениям. Испытания проводили при скорости деформации образцов 50 мм/мин. В качестве прочностных свойств определяли модуль упругости (E_p) и разрушающее напряжение при растяжении (σ_p), а деформационных свойств — относительное удлинение при разрыве (ϵ_p).

Структурно-морфологические свойства образцов, предварительно подвергнутых золотому напылению, исследовали, используя сканирующую электронную микроскопию, на микроскопе JCM-6000 PLUS (JEOL, Акисима, Токио, Япония) с детектором вторичных электронов при ускоряющем напряжении 10 и 15 кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Теплофизические характеристики

На термограмме ПЛА (рис. 1а) присутствуют два пика: первый соответствует температуре стеклования и составляет 65°C, второй — позволяет идентифицировать наличие кристаллической фазы с температурой плавления 157°C. На рис. 1б видно наличие характерного эндотермического пика плавления с температурой 125°C, который соответствует температуре плавления ПЭ, входящего в состав термопластичного компаунда. На термограмме полимерной композиции ПЛА/Alen, в которой доля последнего составляет 20 мас. % (рис. 1с), присутствуют два эндотермических пика, соответствующие температуре плавления ПЭ 118°C и ПЛА — 153°C.

При введении Alen в ПЛА в количестве 20 мас. % наблюдается увеличение энтальпии плавления и кристалличности фазы ПЛА (табл. 4). Это связано с процессом перекристаллизации, в результате которого осуществляется более плотное упорядочивание надмолекулярной структуры ПЛА, обусловленное наличием кристаллической фазы ПЭ в составе полимерной композиции. Смещение эндотермического пика плавления ПЭ в диапазон более низкой температуры 118°C свидетельствует об образовании более дефектных мелких кристаллов, что обусловлено снижением сегментальной подвижности макромолекул ПЭ и затруднением процесса кристаллизации.

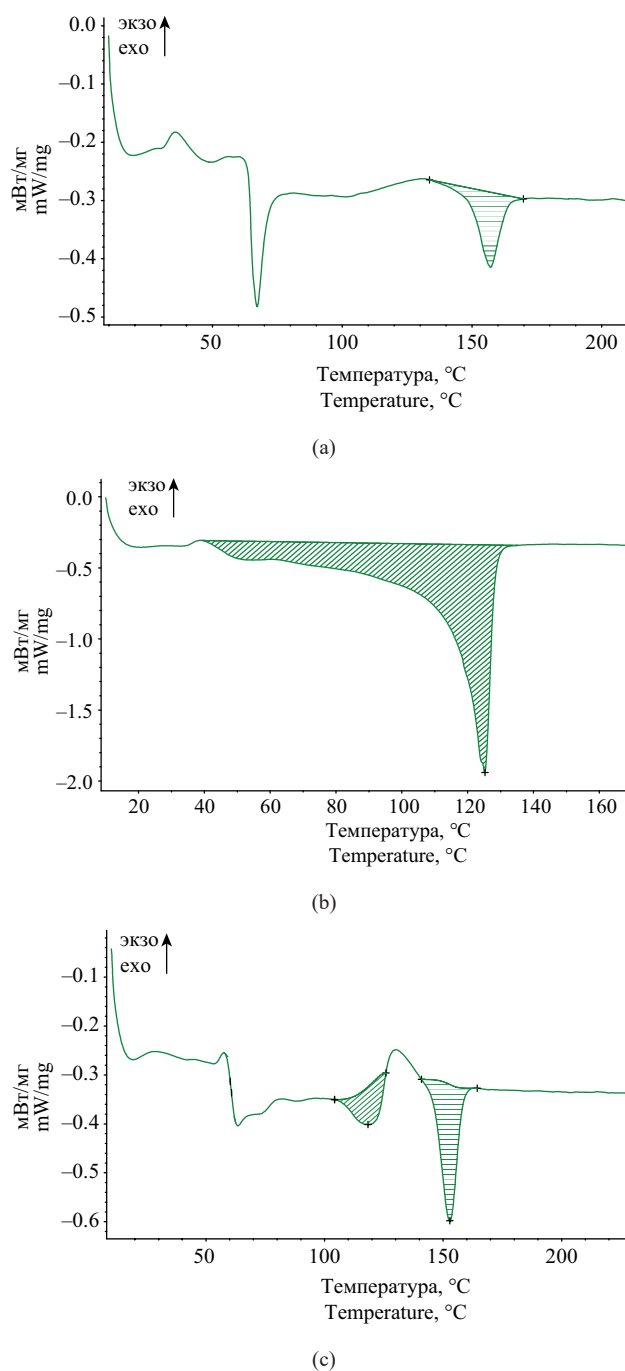


Рис. 1. Термограммы плавления (а) ПЛА, (б) ALEN и (с) ПЛА/ALEN20

Fig. 1. Thermal analysis curves of melting of (a) PLA, (b) ALEN, and (c) PLA/ALEN20

После 150 ч экспонирования при УФ-излучении теплофизические свойства пленок на основе исходных компонентов ПЛА и ALEN, а также полимерных композиций ПЛА/ALEN изменяются (рис. 2). Для пленки на основе ПЛА, в сравнении с исходной, на термограмме появляется пик холодной кристаллизации при 105°C, а энтальпия плавления увеличивается более, чем в 3.5 раза. При этом температура плавления снижается на 5.2°C. Увеличение энтальпии

плавления при УФ-излучении обусловлено частичным разрушением аморфной фазы ПЛА, в результате чего кристаллическая фаза претерпевает изменение надмолекулярного строения — образуются более плотные и крупные кристаллы. Существует и другое объяснение: наличие метастабильной кристаллической структуры ПЛА при УФ-излучении, вероятно, способствует продолжению кристаллизации за счет разрыва напряженных проходных цепей, в связи с чем и увеличивается его степень кристалличности [25].

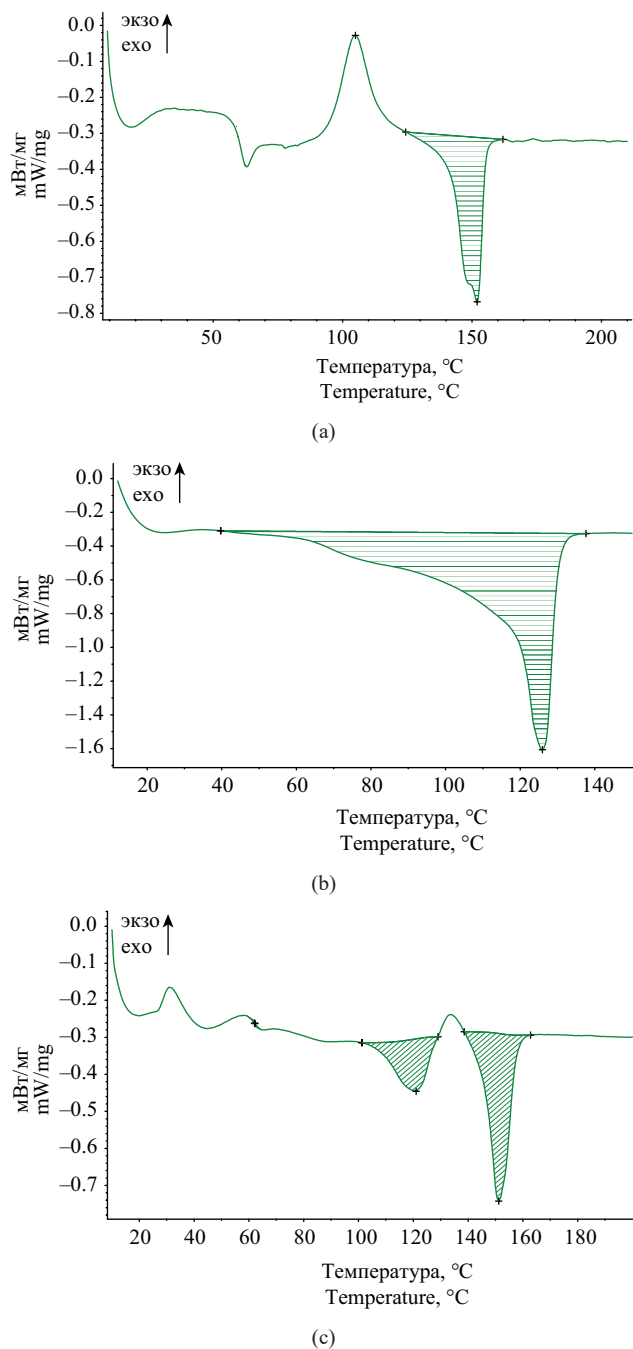


Рис. 2. Термограммы плавления (а) ПЛА, (б) Alen, (с) ПЛА/Alen20 после 150 ч экспонирования при УФ-излучении
Fig. 2. Thermal analysis curves of melting of (a) PLA, (b) Alen, and (c) PLA/Alen20 following 150 h of UV irradiation

Для пленки на основе Alen (рис. 2b) энтальпия плавления снижается на 12%. Разница в температуре плавления до и после УФ-излучения не превышает 1°C. Удельная энергия эндотермического процесса полимерной композиции ПЛА/Alen20 (рис. 2c), в сравнении с исходной, также увеличивается (табл. 4). Так, для ПЭ энтальпия плавления увеличивается в два раза, а для ПЛА — в 1.7 раз. При этом температура плавления для фазы ПЭ увеличивается на 3°C, для фазы ПЛА снижается на 1.6°C.

Таблица 4. Теплофизические свойства полимерных композиций

Table 4. Thermophysical properties of polymer composites

Экспонирование, ч Exposure, h	Образец Sample	$T_m, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_m, \text{Дж/г}$ $\Delta H_m, \text{J/g}$	$\alpha, \%$
0	ПЛА PLA	157	8.7	9.3
	Alen	125	176	60.0
	ПЛА/Alen20 PLA/Alen20	153/118	14.5/5.9	15.5/2.0
150	ПЛА PLA	152	30	32
	Alen	125	155	52.9
	ПЛА/Alen20 PLA/Alen20	151/121	23.9/12.0	25.5/4.1

Характеристики ИК-спектра

Наличие интенсивных полос поглощения на ИК-спектре ПЛА (рис. 3а) в области 1180–1077 см^{-1} свидетельствуют о наличии маятникового колебания метильной CH_3 -группы, что позволяет идентифицировать высокомолекулярный ПЛА, полученный путем полимеризации с раскрытием цикла. Таким образом, ПЛА представляет собой оптически активный поли(D,L-лактид). На ИК-спектре Alen (рис. 3b) присутствуют полосы поглощения в области 2914 и 2847 см^{-1} , свидетельствующие о наличии в составе Alen ассиметричной и симметричной CH_2 -группы, а также полоса поглощения в области 1462 см^{-1} , характерная для ножничной CH_2 -группы. На ИК-спектре также присутствует выраженная полоса поглощения в области 1740 см^{-1} , не характерная для ПЭ, но позволяющая идентифицировать в составе Alen наличие второго компонента, в котором присутствует функциональная карбонильная $\text{C}=\text{O}$ -группа.

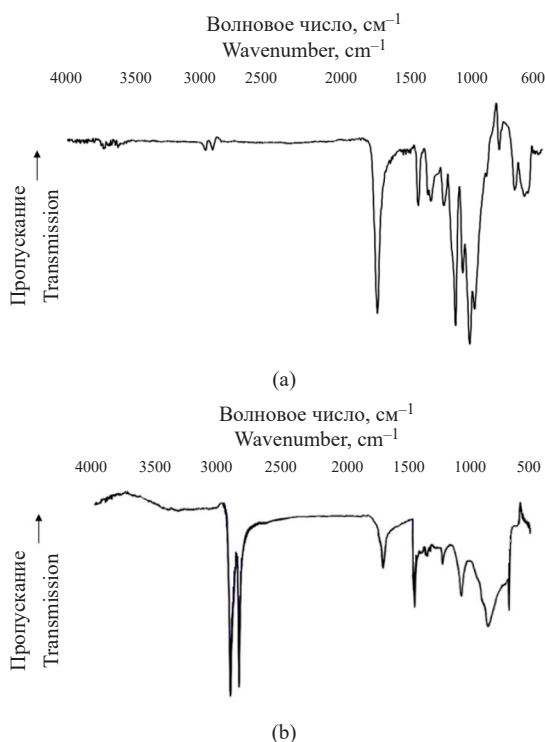


Рис. 3. ИК-спектры (а) ПЛА и (б) Ален

Fig. 3. IR spectra of PLA (a) and ALEN (b)

Согласно источникам [26], наличие ПЭ и карбонильной С=О-группы представляют собой добавку — суперконцентрат, в составе которого содержатся активные элементы переходных металлов (Mn, Fe, Mg), инициирующие распад полимерной матрицы посредством процесса окислительной деструкции. Таким образом, Ален представляет собой ПЭ-композицию с прооксидантной добавкой в виде стеаратов переходных металлов.

По-видимому, механизм фотодеструкции полимерных композиций ПЛА/Ален осуществляется за счет наличия в составе Ален прооксидантной добавки, после чего осуществляется разрушение низкомолекулярной фракции ПЭ с последующей ее фрагментацией. Для матрицы ПЛА фотодеструкция протекает по механизму Норриша II [27], заключающемся в процессе окисления по радикальному типу с образованием С=С-связи, проявляющейся в виде полосы поглощения на ИК-спектре в области 1654 см⁻¹ (рис. 4), на котором также заметно изменение интенсивности характеристических полос поглощения полимерной композиции ПЛА/Ален, что также подтверждает процесс фотодеструкции.

Сканирующая электронная микроскопия

Поверхность экструдированной пленки ПЛА (рис. 5) характеризуется минимальным количеством дефектов, предположительно связанных с процессом

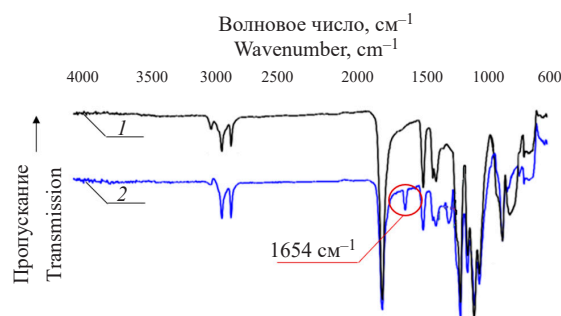
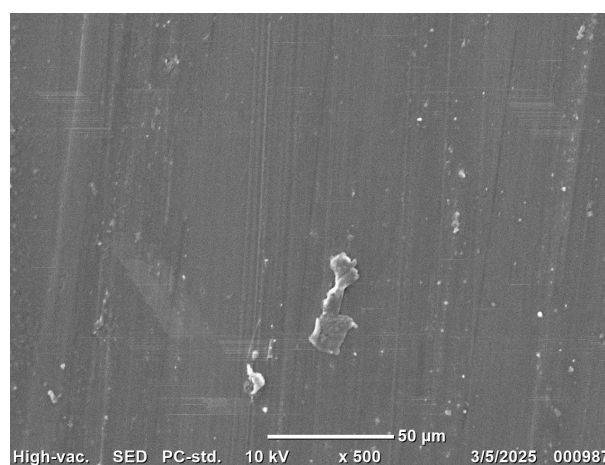
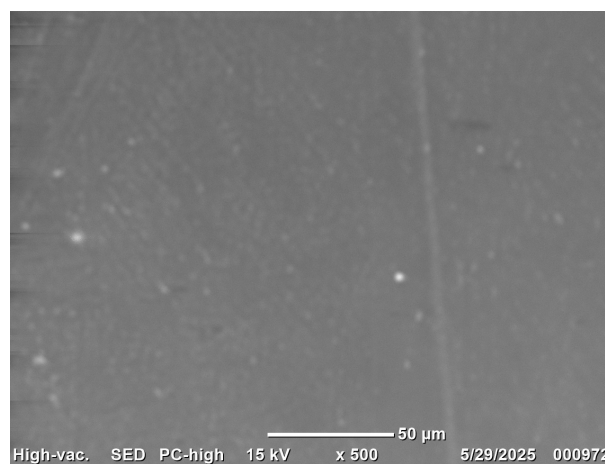


Рис. 4. ИК-спектры полимерной композиции ПЛА/Ален20: (1) исходная, (2) после 150 ч УФ-излучения

Fig. 4. IR spectra of the PLA/ALEN20 polymer composite: (1) initial and (2) after 150 h of UV irradiation



(a)



(b)

Рис. 5. Морфология поверхности пленки ПЛА: (а) исходная, (б) после 150 ч УФ-излучения

Fig. 5. Morphology of the surface of the PLA film: (a) initial, (b) after 150 h of UV radiation

ее изготовления. После облучения УФ-излучением в течение 150 ч поверхность не изменилась, что свидетельствует об отсутствии видимых признаков фотодеструкции в течение всего времени эксперимента.

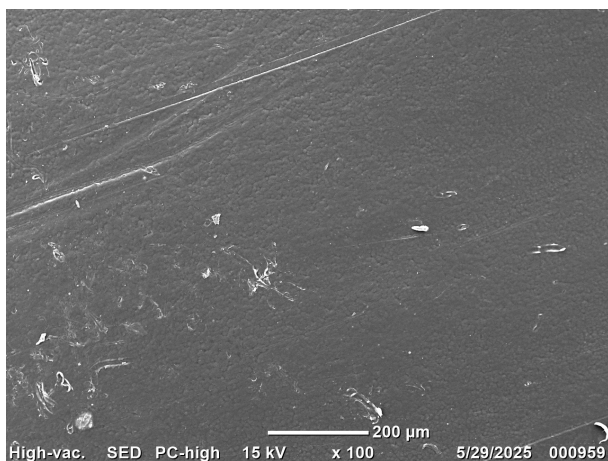
На поверхности пленки ALen (рис. 6а) видны царапины, образовавшиеся предположительно в процессе экструзии, и заметны сферолиты (рис. 6б) (средний размер по изображению ~ 7 мкм). По прошествии 150 ч при УФ-излучении на поверхности пленки образовались широкие сквозные трещины (рис. 6с), количество дефектов увеличилось, а сферолитная структура стала менее заметной (рис. 6д), что является результатом фотодеструкции.

Морфология поверхности полимерной композиции ПЛА/ALen представлена на рис. 7. При получении такой композиции экструзионным способом формируется структурно неоднородная пленка (рис. 7а). При большем увеличении (рис. 7б) видны домены, что связано с фазовым разделением ПЛА и ALen. После 150 ч экспонирования в УФ-камере, на поверхности образуются микротрещины (рис. 7с и 7д), что свидетельствует о фотодеструкции, причем, вероятнее всего, по фазе ALen.

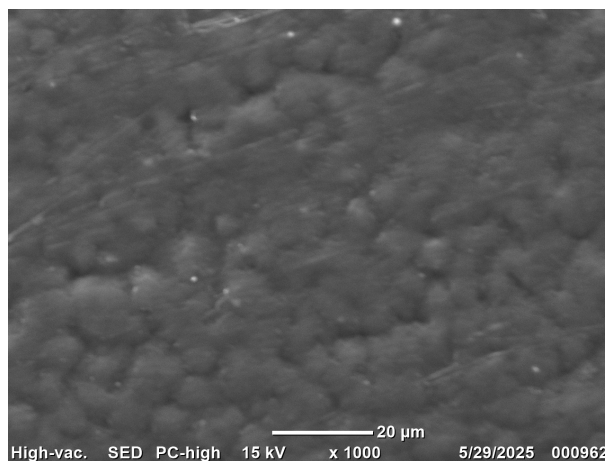
Механические характеристики

Для исходных пленок ПЛА и ALen разрушающее напряжение при растяжении составляет 67.2 и 19.2 МПа соответственно, модуль упругости — 1600 и 600 МПа. При увеличении содержания ALen в смесях с ПЛА до 20 мас. % разрушающее напряжение при растяжении снижается на 53% (31.5 МПа), относительное удлинение при разрыве — на 29% (3.0%), модуль упругости — на 34% (1050 МПа) (рис. 8), что обусловлено образованием гетерогенной структуры из-за низкого межмолекулярного взаимодействия вследствие разной полярности исходных компонентов. При этом относительное удлинение при разрыве для исходной пленки ПЛА составляет 4.2%, а для пленки ALen — 3.2%.

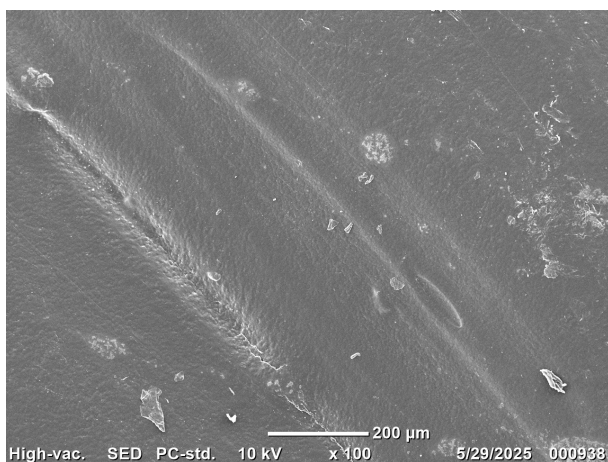
После 150 ч воздействия УФ-излучения разрушающее напряжение при растяжении для пленки ПЛА снижается на 67%, относительное удлинение при разрыве — на 33%, модуль упругости на 50%



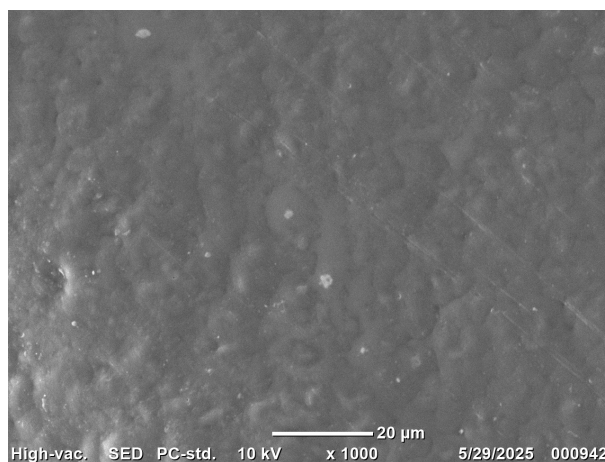
(a)



(b)



(c)



(d)

Рис. 6. Морфология поверхности пленки ALen: (а) и (б) исходная, (с) и (д) после 150 ч УФ-излучения

Fig. 6. Surface morphology of the ALen film: (a) and (b) initial, (c) and (d) after 150 h of UV radiation

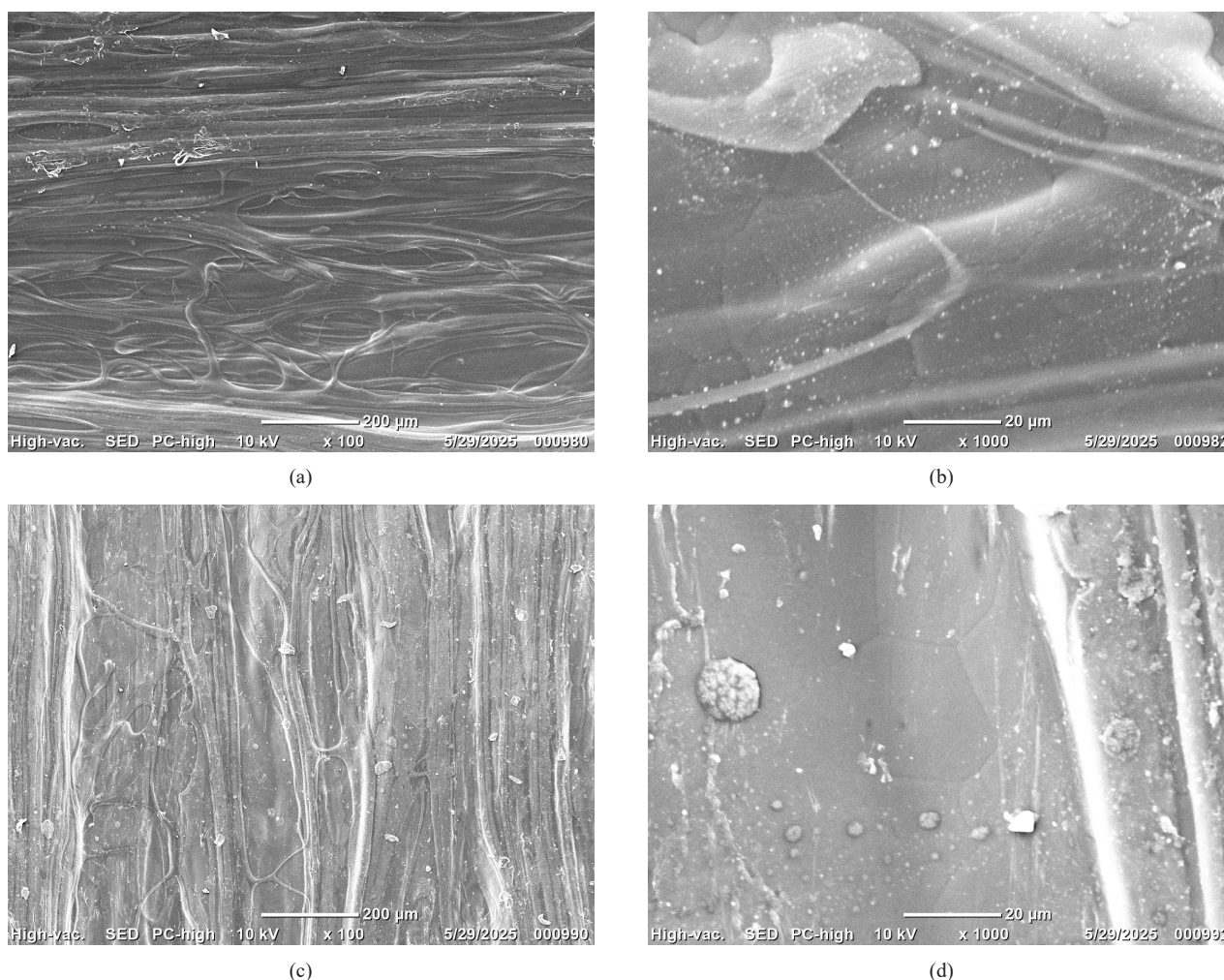


Рис. 7. Морфология поверхности пленки ПЛА/Alen20: (a) и (b) исходная, (c) и (d) после 150 ч УФ-излучения
Fig. 7. Surface morphology of the PLA/Alen20: (a) and (b) initial, (c) and (d) after 150 h of UV radiation

и составляет 800 МПа (табл. 5). Для пленки на основе Alen определить значения механических свойств не представляется возможным из-за наличия большого количества сквозных отверстий, которые, к тому же, являются концентраторами напряжения. Для полимерной композиции на основе ПЛА/Alen20 разрушающее напряжение при растяжении, как и модуль упругости снижается на 82% от исходной величины, преимущественно разрушаясь на границе раздела фаз ПЛА/ПЭ. При этом относительное удлинение при разрыве практически не изменяется в сравнении с исходной величиной полимерной композиции ПЛА/Alen20 и составляет 2.8%.

Таким образом, разработанные биокомпозиционные полимерные материалы являются перспективными для изготовления полимерных изделий из них, характеризуются оптимальными эксплуатационными свойствами и ускоренной кинетикой фотохимической деструкции.

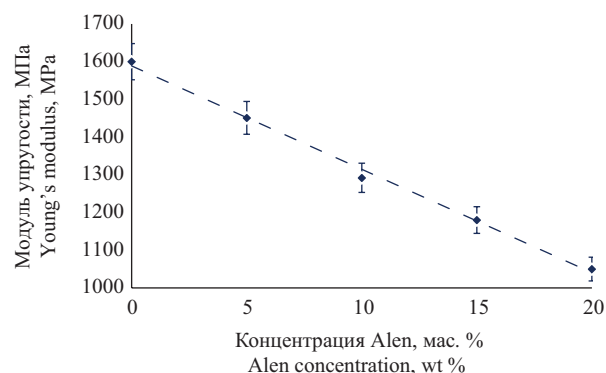


Рис. 8. Влияние концентрации ALEN на модуль упругости полимерной композиции ПЛА/ALEN

Fig. 8. Effect of the ALEN concentration on the Young's modulus of the PLA/ALEN polymer composite

Таблица 5. Деформационно-прочностные свойства полимерных композиций

Table 5. Deformation and strength properties of polymer composites

Композиция Composites	Деформационно-прочностные свойства Deformation and strength properties		
	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа Tensile stress at break, MPa	Относительное удлинение при разрыве, % Elongation at break, %	Модуль упругости, МПа Young's modulus, MPa
0 ч экспонирования 0 h of exposure			
ПЛА PLA	67.2	4.2	1600
Alen	19.2	3.2	600
ПЛА/Alen5 PLA/Alen5	55.1	3.8	1451
ПЛА/Alen10 PLA/Alen10	44.0	3.4	1292
ПЛА/Alen15 PLA/Alen15	37.8	3.2	1181
ПЛА/Alen20 PLA/Alen20	31.5	3.0	1050
150 ч экспонирования 150 h of exposure			
ПЛА PLA	22.4	2.8	800
Alen	–	–	–
ПЛА/Alen5 PLA/Alen5	19.8	3.0	660
ПЛА/Alen10 PLA/Alen10	12.6	2.9	421
ПЛА/Alen15 PLA/Alen15	7.2	2.9	239
ПЛА/Alen20 PLA/Alen20	5.7	2.8	189

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование, направленное на определение фотохимической деструкции полимерных композиций на основе ПЛА, наполненного термопластичным компаундом A-Len®. При экструзии полимерных композиций фаза ПЛА в смеси с Alen претерпевает изменение надмолекулярной структуры, проявляющееся в увеличении степени кристалличности. Это вызвано наличием фазы ПЭ. Для нее, в свою очередь, снижается сегментальная подвижность макромолекул, что влияет на образование более дефектных и мелких кристаллов и, как следствие, на снижение степени кристалличности. Выявленные структурные особенности полимерных

композиций влияют на снижение их эксплуатационных свойств, вследствие разной полярности исходных компонентов.

Воздействие УФ-излучения на Alen и ПЛА/Alen приводит к образованию дефектов структуры, а также снижению деформационно-прочностных свойств. Наиболее вероятным объяснением фотодеструкции является наличие в составе Alen прооксидантной добавки. В таком случае сначала деструктирует низкомолекулярная фракция ПЭ с последующей фрагментацией ПЭ-матрицы, а для ПЛА осуществляется фотохимическая деструкция по механизму Норриша II, заключающаяся в протекании окислительной деструкции по радикальному типу с образованием C=C-связи.

Установленные закономерности могут быть использованы при разработке биокомпозиционных материалов с ускоренной кинетикой фотохимической деструкции.

Благодарности

Исследование методом сканирующей электронной микроскопии материалов, использованных в данной работе, выполнено на оборудовании в Центре коллективного пользования «Центр исследований полимеров» Института синтетических полимерных материалов имени Н.С. Ениколопова Российской академии наук.

Acknowledgments

Scanning electron microscopy of the materials used in this work was performed using equipment at the Polymer Research Center, a shared-use facility of the Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials, Russian Academy of Sciences.

Вклад авторов

И.Ю. Васильев — планирование эксперимента, написание и редактирование текста статьи.

В.С. Петренко — проведение исследования.

В.А. Род — проведение исследования.

Д.А. Голобоков — проведение исследования, написание и редактирование текста статьи.

Authors' contributions

I.Yu. Vasilyev — experiment planning, writing and editing the text of the article.

V.S. Petrenko — conducting the study.

V.A. Rod — conducting the study.

D.A. Golobokov — conducting the study, writing and editing the text of the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повернов П.А., Шибряева Л.С., Аншин С.М. Влияние модифицирующих добавок на структуру и свойства биоразлагаемых смесей на основе поли-3-гидроксibuтирата и бутадиен-нитрильного каучука. *Тонкие химические технологии*. 2024;19(6):517–527. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-517-527>
2. Студеникина Л.Н., Протасов А.В., Мельников А.А., Поваляева Т.Р., Леонова А.А. Композитные материалы на основе наполненного полисахаридами полиэтилена: получение, применение, утилизация. *Инженерные технологии*. 2025;1(9):126–133.
3. Абушахманова З.Р., Масталыгина Е.Е., Пантюхов П.В., Ольхов А.А., Бровина С.Д., Гуйван М.Ю., Попов А.А. Исследование закономерностей формирования структуры и характера взаимодействия полиэтилена и поликапролактона в смесях. *Журн. физ. химии*. 2024;98(7):3–12. <https://doi.org/10.31857/S0044453724070012>, <https://www.elibrary.ru/pwvunn>
4. Pekhtasheva E., Mastalygina E., Leonova I., Palanisamy S., Alagarsamy A., Ayrilmis N., Sillanpää M., Al-Farraj S.A. Investigation of toxicity in textile materials from natural and synthetic-based polymers utilizing bioassay performances. *BioResources*. 2024;20(1):765–789. <https://doi.org/10.15376/biores.20.1.765-789>
5. El-Taweel S.H., Al-Hamdi A. Starch as a successful biodegradable nucleating agent in biodegradable PHBV/PHO blends. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2024;149(4):1351–1364. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12791-0>
6. Язлакова З., Амангелдиева М., Аманова Г., Реджепова С. Хитиновые пленки и их использование в современных технологиях. *Ceteris Paribus*. 2025;4:33–35.
7. Фоторянская А.М., Кудышкин В.О. Модификация низкомолекулярного полиэтилена маленным ангидридом и хитозаном. *Пластические массы*. 2024;6:40–42. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-06-40-42>

REFERENCES

1. Povernov P.A., Shibryaeva L.S., Anshin S.M. Influence of modifying additives on the structure and properties of biodegradable mixtures based on poly-3-hydroxybutyrate and nitrile butadiene rubber. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2024;19(6): 517–527. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-517-527>
2. Studenikina L.N., Protasov A.V., Melnikov A.A., Povalyayeva T.R., Leonova A.A. Composite materials based on polysaccharide-filled polyethylene: production, application, disposal. *Inzhenernye Tekhnologii = Engineering Technologies*. 2025;1(9):126–133 (in Russ.).
3. Abushakhmanova Z.R., Mastalygina E.E., Pantuykhov P.V., et al. Structure Formation and Interaction of Polyethylene and Polycaprolactone in Blends. *Russ. J. Phys. Chem.* 2024;98(7): 1363–1371. <https://doi.org/10.1134/S0036024424700353>, <https://www.elibrary.ru/qyhchh> [Original Russian Text: Abushakhmanova Z.R., Mastalygina E.E., Pantuykhov P.V., Olkhov A.A., Brovina S.D., Guyvan M.Yu., Popov A.A. Structure Formation and Interaction of Polyethylene and Polycaprolactone in Blends. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*. 2024;98(7):3–12 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044453724070012>, <https://www.elibrary.ru/pwvunn>]
4. Pekhtasheva E., Mastalygina E., Leonova I., Palanisamy S., Alagarsamy A., Ayrilmis N., Sillanpää M., Al-Farraj S.A. Investigation of toxicity in textile materials from natural and synthetic-based polymers utilizing bioassay performances. *BioResources*. 2024;20(1):765–789. <https://doi.org/10.15376/biores.20.1.765-789>
5. El-Taweel S.H., Al-Hamdi A. Starch as a successful biodegradable nucleating agent in biodegradable PHBV/PHO blends. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2024;149(4):1351–1364. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12791-0>
6. Yazlakowa Z., Amangeldyewa M., Amanowa G., Rejepowa S. Chitin films and their applications in modern technologies. *Ceteris Paribus*. 2025;4:33–35 (in Russ.).

8. Gul-E-Nayyab, Zakaria M.R.Sh.B., Abid M.B., Shamim A., Suradi S.S., Marsi N.B., Kormin F.Bt. A review on biodegradable composite films containing organic material as a natural filler. *J. Inorgan. Organomet. Polym. Materials*. 2024;35:2126–2161. <https://doi.org/10.1007/s10904-024-03217-x>
9. Monina A.P., Apryatina K.V., Zaitsev S.D., Smirnova O.N., Yunin P.A., Smirnova L.A. Biodegradable material based on starch-g-polyvinyl acetate copolymer with bactericidal properties. *Polym. Bull.* 2024;81:10609–10630. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05205-0>
10. Liu Sh., Tang Sh., Lu Yu., Su T., Wang Zh. Preparation of esterified starches with different amylose content and their blending with polybutylene succinate. *Int. J. Mol. Sci.* 2024;25(12):6301. <https://doi.org/10.3390/ijms25126301>
11. Ольхов А.А., Пантюхов П.В., Масталыгина Е.Е., Абушахманова З.Р., Овчинников В.А., Купинский Н.Г., Попов А.А. Технологические вызовы при производстве изделий из дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов. *Плехановский научный бюллетень*. 2024;1(25):132–138. <https://www.elibrary.ru/tyzgb>
12. Kuzmin A.M., Ayrlimis N., Özdemir F., Kanat G. Effect of content and particle size of used beverage carton pieces on the properties of HDPE composites. *BioResources*. 2023;18(2):2815–2825. <https://doi.org/10.15376/biores.18.2.2815-2825>
13. Brovina S.D., Mastalygina E.E., Trofimchuk E.S., Popov A.A. Development of materials based on poly(lactic acid) and copper(II) sulfate impregnated by the crazing method. *Colloid J.* 2024;86(1):4–13. <https://doi.org/10.1134/S1061933X23601178>
14. Сиразетдинов А.В., Никифоров А.А., Вольфсон С.И. Полимерные композиционные материалы на основе полилактида. *Каучук и резина*. 2021;80(6):326–336. <https://doi.org/10.47664/0022-9466-2021-80-6-326-336>
15. Шаповалов В.М., Винидиктова Н.С., Коваленко М.А., Конакова О.В. Биоразлагаемые пластики на основе растительного сырья: разновидности, свойства, области применения. *Полимерные материалы и технологии*. 2024;10(2):6–19. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-2-6-19>
16. Подденежный Е.Н., Дробышевская Н.Е., Бойко А.А., Шаповалов В.М. Применение льнокожеры для формирования биоразлагаемых композитов с полилактидной матрицей. *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*. 2023;4(95):22–29. <https://www.elibrary.ru/eelvwg>
17. Мичуров Д.М., Шкуро А.Е., Глухих В.В. Исследование физико-механических свойств композитов с полимерной фазой полилактида и костью конопли. *Вестник Технологического университета*. 2024;27(1):59–63. https://doi.org/10.55421/1998-7072_2024_27_1_59
18. Тертышная Ю.В., Подзорова М.В., Карпова С.Г., Кривандин А.В. Структурные особенности пленок полилактида и натурального каучука, полученных из раствора. *Химическая физика*. 2024;43(4):110–118. <https://doi.org/10.31857/S0207401X24040133>
19. Подденежный Е.Н., Бойко А.А., Дробышевская Н.Е., Шаповалов В.М. Биоразлагаемые полимерные композиты, наполненные кукурузным крахмалом (обзор). *Полимерные материалы и технологии*. 2024;10(3):6–19. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-3-6-19>
20. Баженов Н.С., Губанова М.И., Кириш И.А., Банникова О.А., Дымицкий В.А. Современное состояние и использование биоразлагаемых материалов. *Health, Food & Biotechnology*. 2024;6(3):42–56. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i3.s232>
7. Futoryanskaya A.M., Kudyshkin V.O. Modification of low molecular weight polyethylene with maleic anhydride and chitosan. *Plasticheskie Massy*. 2024;6:40–42 (in Russ.). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-06-40-42>
8. Gul-E-Nayyab, Zakaria M.R.Sh.B., Abid M.B., Shamim A., Suradi S.S., Marsi N.B., Kormin F.Bt. A review on biodegradable composite films containing organic material as a natural filler. *J. Inorgan. Organomet. Polym. Materials*. 2024;35:2126–2161. <https://doi.org/10.1007/s10904-024-03217-x>
9. Monina A.P., Apryatina K.V., Zaitsev S.D., Smirnova O.N., Yunin P.A., Smirnova L.A. Biodegradable material based on starch-g-polyvinyl acetate copolymer with bactericidal properties. *Polym. Bull.* 2024;81:10609–10630. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05205-0>
10. Liu Sh., Tang Sh., Lu Yu., Su T., Wang Zh. Preparation of esterified starches with different amylose content and their blending with polybutylene succinate. *Int. J. Mol. Sci.* 2024;25(12):6301. <https://doi.org/10.3390/ijms25126301>
11. Olkhov A.A., Pantyukhov P.V., Mastalygina E.E., Abushakhmanova Z.R., Ovchinnikov V.A., Kupinsky N.G., Popov A.A. Technological challenges in the production of goods from dispersed-filled polymer composite materials. *Plekhonovskii Nauchnyi Byulleten'*. 2024;1(25):132–138 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/tyzgb>
12. Kuzmin A.M., Ayrlimis N., Özdemir F., Kanat G. Effect of content and particle size of used beverage carton pieces on the properties of HDPE composites. *BioResources*. 2023;18(2):2815–2825. <https://doi.org/10.15376/biores.18.2.2815-2825>
13. Brovina S.D., Mastalygina E.E., Trofimchuk E.S., Popov A.A. Development of materials based on poly(lactic acid) and copper(II) sulfate impregnated by the crazing method. *Colloid J.* 2024;86(1):4–13. <https://doi.org/10.1134/S1061933X23601178>
14. Sirazetdinov A.V., Nikiforov A.A., Volfson S.I. Polymer composites based on polylactide. *Kauchuk i Rezina*. 2021;80(6):326–336 (in Russ.). <https://doi.org/10.47664/0022-9466-2021-80-6-326-336>
15. Shapovalov V.M., Vinidiktova N.S., Kovalenko M.A., Konakova O.V. Biodegradable plastics based on plant raw materials: varieties, properties, applications. *Polimernye Materialy i Tekhnologii = Polymer Materials and Technologies*. 2024;10(2):6–19 (in Russ.). <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-2-6-19>
16. Poddenezhny E.N., Drobyshevskaya N.E., Boiko A.A., Shapovalov V.M. The use of flax fiber for forming biodegradable composites with a polylactide matrix. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.O. Sukhogo*. 2023;4(95):22–29 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/eelvwg>
17. Michurov D.M., Shkuro A.E., Glukhikh V.V. Study of the physical and mechanical properties of composites with a polymer phase of polylactide and hemp shives. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta = Herald of Technological University*. 2024;27(1):59–63 (in Russ.). https://doi.org/10.55421/1998-7072_2024_27_1_59
18. Tertyshnaya Y.V., Podzorova M.V., Karpova S.G., et al. Structural Features of Polylactide and Natural Rubber Films Produced by Solution Casting. *Russ. J. Phys. Chem. B*. 2024;18(2):592–598. <https://doi.org/10.1134/S1990793124020313> [Original Russian Text: Tertyshnaya Yu.V., Podzorova M.V., Karpova S.G., Krivandin A.V. Structural Features of Polylactide and Natural Rubber Films Produced by Solution Casting. *Khimicheskaya Fizika*. 2024;43(4):110–118 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0207401X24040133>]

21. Лыткина Д.Н., Шалыгина К.Д., Гигилев А.С., Коротченко Н.М., Курзина И.А., Козик В.В. Физико-химические свойства биосовместимых композитов на основе гидроксиапатита и сополимера лактида и гликолида. *Вестник Томского государственного университета. Химия.* 2023;29:116–139. <https://doi.org/10.17223/24135542/29/11>
22. Миронов В.В., Трофимчук Е.С., Загустина Н.А., Иванова О.А., Вантеева А.В., Бочкова Е.А., Острикова В.В., Чжан Ш. Твердофазная биодеградация полилактида (обзор). *Прикладная биохимия и микробиология.* 2022;58(6): 537–550. <https://doi.org/10.31857/S0555109922060101>
23. Купинский Н.Г., Пантюхов П.В., Абушахманова З.Р., Ольхов А.А., Масталыгина Е.Е., Попов А.А. Изучение возможности использования стеаратов переходных металлов в качестве основы прооксидантной добавки. В сб.: *Новые материалы и технологии для устойчивого развития: Материалы III Международной научной конференции.* М.; 2024. С. 110–113. <https://www.elibrary.ru/xfngwe>
24. Купинский Н.Г., Абушахманова З.Р., Пантюхов П.В., Масталыгина Е.Е., Овчинников В.А., Ольхов А.А., Попов А.А. Стеараты переходных металлов как оксодобавки для полиолефинов. В сб.: *Экологические аспекты в науке и образовании: Материалы межвузовской научной конференции.* М.; 2023. С. 34–35. <https://www.elibrary.ru/wejqrx>
25. Подзорова М.В., Тertyshnaya Ю.В., Московский М.Н. Фотодеградация композиционных материалов полилактид – натуральный каучук. *Известия Кабардино-Балкарского государственного университета.* 2022;12(4):118–123. <https://www.elibrary.ru/bkzwgo>
26. Овчинников В.А., Абушахманова З.Р., Масталыгина Е.Е., Пантюхов П.В., Мамин Э.А., Купинский Н.Г., Попов А.А. Кинетические особенности окислительной деструкции полиэтилена при добавлении стеаратов различных переходных металлов. *Все материалы. Энциклопедический справочник.* 2024;1:31–36. <https://www.elibrary.ru/youkwo>
27. Михеев Ю.А., Ломакин С.М., Усачев С.В., Ковержанова Е.В., Арцис М.И., Стоянов О.В. Фотодеградация полукристаллического полилактида под действием УФ-радиации. II. Стадии матричной трансформации по данным метода ДСК. *Вестник Технологического университета.* 2024;27(10):16–22. https://doi.org/10.55421/1998-7072_2024_27_10_16
19. Poddenezhny E.N., Boiko A.A., Drobyshekskaya N.E., Shapovalov V.M. Biodegradable polymer composites filled with corn starch (Review). *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer Materials and Technologies.* 2024;10(3):6–19 (in Russ.). <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-3-6-19>
20. Bazhenov N.S., Gubanova M.I., Kirsh I.A., Bannikova O.A., Dymytsky V.A. Current state and use of biodegradable materials. *Health, Food & Biotechnology.* 2024;6(3):42–56 (in Russ.). <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i3.s232>
21. Lytkina D.N., Shalygina K.D., Gigilev A.S., Korotchenko N.M., Kurzina I.A., Kozik V.V. Physicochemical properties of biocompatible composites based on hydroxyapatite and copolymer of lactide and glycolide. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya = Tomsk State University Journal of Chemistry.* 2023;29:116–139 (in Russ.). <https://doi.org/10.17223/24135542/29/11>
22. Mironov V.V., Trofimchuk E.S., Zagustina N.A. et al. Solid-Phase Biodegradation of Poly lactides (Review). *Appl. Biochem. Microbiol.* 2022;58(6):665–676. <https://doi.org/10.1134/s0003683822060102> [Original Russian Text: Mironov V.V., Trofimchuk E.S., Zagustina N.A., Ivanova O.A., Vanteeiva A.V., Bochkova E.A., Ostrikova V.V., Zhang Sh. Solid-Phase Biodegradation of Poly lactides (Review). *Prikladnaya Biokhimiya i Mikrobiologiya.* 2022;58(6):537–550 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0555109922060101>]
23. Kupinskii N.G., Pantyukhov P.V., Abushakhmanova Z.R., Olkhov A.A., Mastalygina E.E., Popov A.A. Study of the potential use of transition metal stearates as a basis for a pro-oxidant additive. In: *New Materials and Technologies for Sustainable Development: Proceedings of the Third International Scientific Conference.* Moscow; 2024. P. 110–113 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/xfngwe>
24. Kupinskii N.G., Abushakhmanova Z.R., Pantyukhov P.V., Mastalygina E.E., Ovchinnikov V.A., Olkhov A.A., Popov A.A. Transition metal stearates as oxo-additives for polyolefins. In: *Environmental Aspects in Science and Education: Proceedings of the Interuniversity Scientific Conference.* Moscow; 2023. P. 34–35 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/wejqrx>
25. Podzorova M.V., Tertyshnaya Yu.V., Moskovskiy M.N. Photodegradation of composite materials polylactide – natural rubber. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University.* 2022;12(4):118–123 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/bkzwgo>
26. Ovchinnikov V.A., Abushakhmanova Z.R., Mastalygina E.E., Pantyukhov P.V., Mamin E.A., Kupinskiy N.G., Popov A.A. Kinetic features of oxidative degradation of polyethylene with addition of stearates of various transition metals. *Vse Materialy. Ehntsiklopedicheskii Spravochnik.* 2024;1:31–36 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/youkwo>
27. Mikheev Yu.A., Lomakin S.M., Usachev S.V., Koverzanova E.V., Artsis M.I., Stoyanov O.V. Photodegradation of semi-crystalline polylactide under UV radiation. II. Stages of matrix transformation according to the DSC method. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta = Herald of Technological University.* 2024;27(10):16–22 (in Russ.). https://doi.org/10.55421/1998-7072_2024_27_10_16

Об авторах

Васильев Илья Юрьевич, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО Московский политехнический университет (Мосполитех) (107023, Россия, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38). E-mail: iljanaras@ya.ru. Scopus Author ID 57195569317, ResearcherID ABW-6525-2022, SPIN-код РИНЦ 2038-4156, <https://orcid.org/0000-0001-8488-5907>

Петренко Виктория Сергеевна, студент, ФГАОУ ВО Московский политехнический университет (Мосполитех) (107023, Россия, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38). E-mail: petrenkoviktoria480@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0006-4131-8623>

Род Виктор Андреевич, студент, ФГАОУ ВО Московский политехнический университет (Мосполитех) (107023, Россия, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38). E-mail: vikdor.andreevich@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 5509-7202, <https://orcid.org/0009-0008-8333-4749>

Голобоков Дмитрий Александрович, младший научный сотрудник, ФГБУН Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук, (117393, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, д. 70). E-mail: d.golobokov@ispm.ru. ResearcherID MBG-4040-2025, SPIN-код РИНЦ 7346-6740, <https://orcid.org/0000-0002-4678-9866>

About the Authors

Ilya Yu. Vasilyev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya ul., Moscow, 107023, Russia). E-mail: iljanaras@ya.ru. Scopus Author ID 57195569317, ResearcherID ABW-6525-2022, RSCI SPIN-code 2038-4156, <https://orcid.org/0000-0001-8488-5907>

Victoria S. Petrenko, Student, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya ul., Moscow, 107023, Russia). E-mail: petrenkoviktoria480@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0006-4131-8623>

Viktor A. Rod, Student, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya ul., Moscow, 107023, Russia). E-mail: vikdor.andreevich@mail.ru. RSCI SPIN- code 5509-7202, <https://orcid.org/0009-0008-8333-4749>

Dmitrii A. Golobokov, Junior Researcher, Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials of the Russian Academy of Sciences (70, Profsoyuznaya ul., Moscow, 117393, Russia). E-mail: d.golobokov@ispm.ru. ResearcherID MBG-4040-2025, RSCI SPIN-code 7346-6740, <https://orcid.org/0000-0002-4678-9866>