

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-2-6-19>

УДК 678.07-02:621.798

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ ПЛАСТИКИ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ: РАЗНОВИДНОСТИ, СВОЙСТВА, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ (ОБЗОР)

В. М. ШАПОВАЛОВ, Н. С. ВИНДИКТОВА⁺, М. А. КОВАЛЕНКО, О. В. КОНАКОВА

Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

Цель работы — анализ результатов научных исследований, рынка и перспектив применения биоразлагаемых пластиков, содержащих растительное сырье.

В статье представлены основные направления развития и наиболее перспективные типы биоразлагаемых полимерных материалов на основе воспроизводимых растительных компонентов. Проведен анализ известных биоразлагаемых материалов на основе крахмала, основным преимуществом которых является доступность и невысокая цена. Показано, что использование крахмала в качестве наполнителя позволяет облегчить биоразрушение пластиков, но при этом наблюдается снижение их эксплуатационных характеристик. Отмечено, что проблему снижения деформационно-прочностных характеристик таких пластиков можно решить путем использования химически модифицированного крахмала. Так, прочность ориентированных полипропиленовых (ПП) лент при содержании 5%-ного модифицированного крахмала повышается на 25–30% в сравнении с исходным ПП.

Рассмотрены биоразлагаемые полиэфиры, которые чаще всего получают из возобновляемых источников сырья. Такие материалы по своим антиоксидантным и оптическим свойствам, пьезоэлектрическому эффекту не уступают традиционным полимерам и характеризуются высокой биосовместимостью. Однако биоразлагаемые полиэфиры дороже, а показатели их механических свойств значительно хуже.

Приведены примеры биоразлагаемых пластиков, содержащих растительное сырье из отходов продуктов сельского и лесного хозяйства. Показано, что возможно получение биоразлагаемых пластиков на основе полилактида с наполнением растительным сырьем до 70–80%. Результаты испытаний на водопоглощение показали, что образцы с содержанием наполнителя 50 мас.% сохраняют форму и жесткость, водопоглощение составляет менее 15 мас.%, а изменение линейных размеров не превышает 5%, что соответствует параметрам традиционно используемых полимерных композиций (ПК). Использование биоразлагаемых полимерных композитов, содержащих растительное сырье, перспективно в области сельского и коммунального хозяйства, строительной отрасли.

Ключевые слова: биоразлагаемый композиционный материал, утилизация, воспроизводимые природные компоненты, ферментация, крахмал, полиэфиры, полилактид, растительное сырье.

BIODEGRADABLE PLASTICS BASED ON PLANT RAW MATERIALS: VARIETIES, PROPERTIES, APPLICATION AND DEVELOPMENT PROSPECTS (REVIEW)

V. M. SHAPOVALOV, N. S. VINIDIKTOVA⁺, M. A. KOVALENKO, O. V. KONAKOVA

V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus

The purpose of the work is to analyze the results of scientific research, the market and prospects for the

⁺Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: vns_ins@mail.ru

use of biodegradable plastics containing vegetable raw materials.

The article presents the main directions of development and the most promising types of biodegradable polymer materials based on reproducible plant components. The analysis of known biodegradable starch-based materials has been carried out, the main advantage of which is accessibility and low price. It is shown that the use of starch as a filler makes it possible to facilitate the biodegradation of plastics, but at the same time there is a decrease in their performance characteristics. It is noted that the problem of reducing the deformation and strength characteristics of such plastics can be solved by using chemically modified starch. It is shown that the strength of oriented polypropylene (PP) tapes with a content of 5% modified starch increases by 25–30% compared with the initial PP.

Biodegradable polyesters, which are most often obtained from renewable sources of raw materials, are considered. Such materials are not inferior to traditional polymers in their antioxidant and optical properties, piezoelectric effect and are characterized by high biocompatibility. However, biodegradable polyesters are more expensive, and their mechanical properties are much worse.

Examples of biodegradable plastics containing plant raw materials from waste products of agriculture and forestry are given. It has been shown that it is possible to obtain biodegradable plastics based on polylactide with filling with vegetable raw materials up to 70–80%. The results of water absorption tests showed that samples with a filler content of 50 wt.% retain their shape and rigidity, water absorption is less than 15 wt.%, and the change in linear dimensions does not exceed 5%, which corresponds to the parameters of traditionally used polymer composites. The use of biodegradable polymer composites containing plant raw materials is promising in the field of agriculture and public utilities, the construction industry.

Keywords: biodegradable composite material, recycling, renewable natural components, fermentation, starch, polyesters, polylactide, plant raw materials.

Поступила в редакцию 20.05.2024

© В. М. Шаповалов, Н. С. Винидиктова, М. А. Коваленко, О. В. Конакова, 2024

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в [редакцию журнала](#)

Full text of articles can be purchased from the editorial office

Адрес редакции: ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Address: Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus

Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: polmattex@gmail.com

Web: <http://mpri.org.by/izdaniya/pmt/>

Образец цитирования:

Шаповалов В. М., Винидиктова Н. С., Коваленко М. А., Конакова О. В. Биоразлагаемые пластики на основе растительного сырья: разновидности, свойства, области применения (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2023. Т. 10, № 2. С. 6–19. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-2-6-19>

Citation sample:

Shapovalov V. M., Vinidiktova N. S., Kovalenko M. A., Konakova O. V. Biorazlagaemye plastiki na osnove rastitel'nogo syr'ya: raznovidnosti, svoystva, oblasti primeneniya (obzor) [Biodegradable plastics based on plant raw materials: varieties, properties, application and development prospects (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2023, vol. 10, no. 2, pp. 6–19. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-2-6-19>

Литература

Литература

1. Анализ рынка переработки полимерных отходов в России : аналитический отчет // DISCOVERY RESEARCH GROUP : агентство маркетинговых исследований. 2022 [Электронный ресурс]. URL: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Demo_Analiz_rynka_pererabotki_polimernykh_otkhodov_v_Rossii.pdf (дата обращения: 24.04.2024).
2. Бабаева Р. Суставы, еда и ДНК: какое место занимают полимеры в современной жизни // РБК. 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/innovation/621d65569a7947b826978348> (дата обращения: 18.04.2024).
3. Шаповалов В. М., Григорьев А. Я. Рециклинг и утилизация многокомпонентных полимерных систем на основе вторичных термопластов (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2021. Т. 7, № 3. С. 6–19. doi: 10.32864/polymmattech-2021-7-3-6-19
4. Шаповалов В. М., Китиков В. О., Смирнов В. А. Экологические и экономические аспекты использования вторичных материальных ресурсов в задачах устойчивого развития в Республике Беларусь // Горная механика и машиностроение. 2023. № 2. С. 95–105.
5. Буйлова О. Утилизация и переработка упаковки // Unipack.ru : отраслевой портал. 2014 [Электронный ресурс]. URL: <http://article.unipack.ru/50604/> (дата обращения: 12.04.2024).
6. Рахимов М. А., Рахимова Г. М., Иманов Е. М. Проблемы утилизации полимерных отходов // Фундаментальные исследования. 2014. № 8-2. С. 331–334.
7. Geyer R. Production, use, and fate of synthetic polymers // Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions / ed. T. M. Letcher. USA : Academic Press, 2020, pp. 13–32. doi: 10.1016/B978-0-12-817880-5.00002-5
8. Hedayati A., Gholizadeh M., Bagheri T., Abarghouei S., Zamani W. Microplastics in Marine Ecosystems // Sustainable Aquatic Research, 2022, vol. 1, no. 2, pp. 63–73. doi: 10.5281/zenodo.7038554
9. Bajt O. From plastics to microplastics and organisms // FEBS Open bio, 2021, vol. 11, is. 4, pp. 954–966. doi: 10.1002/2211-5463.13120
10. Жихарева В. Глобальные экологические проблемы и пути их решения // +1 (Плюс Один) : коммуникационный проект. 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://plus-one.ru/manual/2022/02/23/globalnye-ekologicheskie-problemy-i-puti-ih-resheniya> (дата обращения: 01.03.2024).
11. Волкова А. В. Рынок утилизации отходов // Институт «Центр развития». 2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://dcenter.hse.ru/data/2018/07/11/1151608260/%D0%A0%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA%20%D1%83%D1%82%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%D0%BE%D1%82%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%202018.pdf> (дата обращения: 21.04.2024).
12. Изучение морфологического состава коммунальных отходов на 20 тестовых площадках Беларуси в летний сезон // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. 2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/izuchenie-morfologicheskogo-sostava-kommunalnyx-otkhodov-na-20-testovyx-ploschadkax-belarusi-v-letnij-sezon-3498/> (дата обращения: 19.04.2024).
13. Шаповалов В. М., Тартаковский З. Л. Многокомпонентные полимерные системы на основе вторичных материалов / под общ. ред. Ю. М. Плещаскевского. Гомель : ИММС НАНБ, 2003. 262 с.
14. Сортировка мусора в России: нововведения, сложности и перспективы // Rcycle.net : все о переработке вторсырья и утилизации отходов. 2019 [Электронный ресурс]. URL: <https://rcycle.net/musor/razdelnyj-sbor/reforma-sortirovki-v-rossii-povovvedeniya-slozhnosti-perspektivy> (дата обращения: 21.04.2024).
15. Китиков В., Барановский И. Состояние и перспективы переработки полимерных отходов // Наука и инновации. 2022. № 5 (231). С. 14–16.
16. Чупрова Л. В., Муллина Э. Р., Мишурина О. В., Ершова О. В. Исследование возможности получения композиционных материалов на основе вторичных полимеров // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. eLIBRARY ID: 22285539
17. Ивановский С. К., Бахаева А. Н., Ершова О. В., Чупрова Л. В. Экологические аспекты проблемы утилизации отходов полимерной упаковки и техногенных минеральных ресурсов // Успехи современного естествознания. 2015. № 1-5. С. 813–817.
18. Зайнуллин Х. Н., Абдрахманов Р. Ф., Ибатуллин У. Г., Минигазимов И. Н., Минигазимов И. С. Обращение с отходами производства и потребления. Уфа : Диалог, 2005. 292 с.
19. Сортировка мусора // КПУП «Гродненский завод по утилизации и механической сортировке отходов». 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://zumso.by/%D1%81%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%B0-%D0%BC%D1%83%D1%81%D0%BE%D1%80%D0%B0/> (дата обращения: 15.04.2024).
20. Воробьева Е. В., Попов А. А. Биоразлагаемые композиты на основе ископаемых видов сырья. Часть I. Стратегии получения, характерные свойства и развитие рынка (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2022. Т. 8, № 2. С. 6–24. doi: 10.32864/polymmattech-2022-8-2-6-24
21. Воробьева Е. В., Попов А. А. Биоразлагаемые композиты на основе ископаемых видов сырья. Часть II: Процесс биodeградации (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2023. Т. 9, № 1. С. 6–22. doi: 10.32864/polymmattech-2023-9-1-6-22
22. Литвяк В. В. Перспективы производства современных упаковочных материалов с применением биоразлагаемых полимерных композиций // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2019. № 2. С. 84–94.
23. Крутько Э. Т., Прокопчук Н. Р., Глоба А. И. Технология биоразлагаемых полимерных материалов: учебно-методическое пособие для студентов вузов. Минск : БГТУ, 2014. 105 с.
24. Все о биоразлагаемых пластиках. Мировой рынок биополимеров – 2019. Часть 2 // Инжиниринговый химико-технологический центр (ИХТЦ). 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://ect-center.com/blog/biodegradable-polymers> (дата обращения: 03.10.2023).
25. Вихарева И. Н., Зарипов И. И., Кинзябулатова Д. Ф., Минигазимов Н. С., Аминова Г. К. Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть I // Нанотехнологии в строительстве. 2020. Т. 12, № 6. С. 320–325. doi: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-320-325
26. Мазитова А. К., Аминова Г. К., Зарипов И. И., Вихарева И. Н. Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть 2 // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 1. С. 32–38. doi: 10.15828/2075-8545-2021-13-1-32-38
27. Сивкова Г. А., Хусаинова А. А. Получение биоразлагаемого пластика из возобновляемого сырья // Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы : сборник статей Международной научно-практической конференции, Саратов, 10 января 2020. Уфа : Аэтерна, 2020. Ч. 2. С. 25–30.

28. European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste. 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://www.ekokom.cz/uploads/attachments/English/Directive%2094_62_EC.pdf (дата обращения: 26.05.2024).
29. Все о биоразлагаемом пластике // Литопласт : сайт компании. 2024 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.litoplast.by/blog/vse-o-biorazлагаемом-plastike/> (дата обращения: 19.05.2024).
30. Тасекеев М. С., Еремеева Л. М. Производство биополимеров как один из путей решения проблем экологии и АПК : аналитический обзор. Алматы : НЦ НТИ, 2009. 200 с.
31. Ермолович О. А. Биоразлагаемые упаковочные пленки на основе химически модифицированных полиолефинов и крахмалов : дисс. канд. тех. Наук : 05.02.01. Минск, 2006. 162 с.
32. Ермолович О. А., Винидиктова Н. С., Макаревич А. В., Орехов Д. А. Биоразлагаемые ориентированные плоские волокна на основе крахмалонаполненного полипропилена // Химические волокна. 2006, № 5. С. 26–30.
33. Бирбасов В. А., Касьянов Г. И. Особенности технологии биоразрушаемых упаковочных материалов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2011. № 4. С. 122–123.
34. Росато Дон. Биопластики: технологии, рынок, перспективы (I часть) // Новые химические технологии : аналитический портал химической промышленности. 2006 [Электронный ресурс]. URL: https://newchemistry.ru/letter.php?n_id=1609&cat_id=&word=%E1%E8%EE%EF%EB%E0%F1%F2%E8%EA%E8 (дата обращения: 03.10.2023).
35. Биоразлагаемый пластик – разновидности, технология производства, основные свойства // Recycle.net : все о переработке вторсырья и утилизации отходов. 2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://recycle.net/plastmassy/biorazлагаemyj-plastik-raznovidnostihnologiya-proizvodstva-osnovnye-svoystva> (дата обращения: 03.10.2023).
36. Биоразлагаемые полимеры в адгезивных системах (часть 1) // Новые химические технологии : аналитический портал химической промышленности. 2006 [Электронный ресурс]. URL: https://newchemistry.ru/letter.php?n_id=3343&cat_id=8&page_id=2 (дата обращения: 03.10.2023).
37. Васильева Н. Г. Биоразлагаемые полимеры // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 22. С. 156–157.
38. Абрамов В. А. Крахмал // Acetyl : [сайт по химии]. 2024 [Электронный ресурс]. URL: <https://acetyl.ru/o/ez6902.php> (дата обращения: 26.05.2024).
39. Янов В. В., Зенитова Л. А. Биоразлагаемые полимеры и полимерные композиции : учебное пособие. Казань : КНИТУ, 2022. 144 с.
40. Kamada A., Rodriguez-Garcia M., Ruggeri F. S., Shen Yi, Levin A., Knowles T. P. J. Controlled self-assembly of plant proteins into high-performance multifunctional nanostructured films // Nature communications, 2021, vol. 12. doi: 10.1038/s41467-021-23813-6
41. Подденежный Е. Н., Бойко А. А., Алексеенко А. А., Дробышевская Н. Е., Урецкая О. В. Прогресс в получении биоразлагаемых композиционных материалов на основе крахмала (обзор) // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. 2015. № 2. С. 31–41.
42. Лешина А. Пластики биологического происхождения // Химия и жизнь. 2012. № 9. С. 2–5.
43. Суворова А. И., Тюкова И. С., Труфанова Е. И. Биоразлагаемые полимерные материалы на основе крахмала // Успехи химии. 2000. Т. 69, № 5. С. 494–504.
44. Павленок А. В., Давыдова О. В., Дробышевская Н. Е., Подденежный Е. Н., Бойко А. А., Шаповалов В. М. Получение и свойства биоразлагаемых композиционных материалов на основе поливинилового спирта и крахмала // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2018. № 1. С. 38–46.
45. Ушаков С. Н. Поливиниловый спирт и его производные : в 2 т. Т. 1. Москва ; Ленинград : Академия наук СССР, 1960. 553 с.
46. Рыбкина С. П., Пахаренко В. В., Булах В. Ю., Пахаренко В. А. Биоразлагаемые упаковочные материалы на основе полисахаридов (крахмала) // Пластические массы. 2012. № 2. С. 61–64.
47. Рихтер М., Аугустат З., Ширбаум Ф. Избранные методы исследования крахмала. Москва : Пищевая промышленность, 1975. 183 с.
48. Vinidiktova N. S., Ermolovich O. A., Goldade V. A., Pinchuk L. S. Strength of biodegradable PP tapes filled with a modified starch // Mechanics of Composite Materials, 2006, vol. 42, no. 3, pp. 273–282. doi: 10.1007/s11029-006-0037-0
49. Винидиктова Н. С., Гольдаде В. А., Ермолович О. А., Азизбекян С. Г. Экологически безопасные ориентированные пленки на основе полипропилена // Материалы, технологии, инструменты. 2008. Т. 13, № 4. С. 14–19.
50. Ермолович О. А., Винидиктова Н. С. Структурно-механические характеристики пленок на основе полипропилена и химически модифицированного крахмала // Композиционные материалы в промышленности : материалы XXVI Международной научной конференции (26 мая–2 июня 2006 г., Ялта) / редкол.: Боголюбов В. С. [и др.]. Киев, 2006. С. 395–397.
51. Вильданов Ф. Ш., Латыпова Ф. Н., Красуцкий П. А., Чанышев Р. Р. Биоразлагаемые полимеры – современное состояние и перспективы использования // Башкирский химический журнал. 2012. Т. 19, № 1. С. 135–139.
52. Кофман В. Я. Перспективные направления переработки избыточного активного ила. Получение летучих жирных кислот (обзор) // Водоснабжение и санитарная техника. 2022, № 1. С. 51–60. doi: 10.35776/VST.2022.01.08
53. Геворкян Э. Л., Кордюкова А. П. Может ли биоразлагаемый пластик решить реальные экологические проблемы? // Молодой ученый. 2022. № 10 (405). С. 24–26.
54. Мяленко Д. М. Биоразлагаемые полимерные материалы для упаковки молочной и пищевой продукции // Молочная промышленность. 2020. № 11. С. 44–46. doi: 10.31515/1019-8946-2020-11-44-46
55. Бахаева А. Н., Ивановский С. К. Обзор оксо-биоразлагаемых добавок используемых для утилизации упаковочных материалов // Молодой ученый. 2015. № 10 (90). С. 156–158.
56. ГОСТ 33747-2016. Оксо-биоразлагаемая упаковка. Общие технические условия. Введ. 01.03.2017. Москва : Стандартинформ, 2016. 8 с.
57. Федотова О. Б. О биоразлагаемой упаковке и перспективе ее использования // Молочная промышленность. 2020. № 1. С. 10–12.
58. Лескова С. А. Проблемы биодegradации полиолефинов на примере полиэтилена // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 40. С. 309–315.
59. Биопластики: перспективы в России // RUPEC : информационно-аналитический центр. 2014 [Электронный ресурс]. URL: <https://rupes.ru> (дата обращения: 15.04.2024).
60. Конакова О. В., Тимофеев А. А., Винидиктова Н. С. Динамика биодegradации композиционных материалов для тары и упаковки // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : тезисы докладов VI Республиканской научно-технической конференции молодых ученых, г. Гомель, 9–11 ноября 2020 г. Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2020. С. 102–103.
61. Конакова О. А., Винидиктова Н. С. Биоразлагаемые материалы бытового назначения: опыт и перспективы разработок // Молодежь в науке – 2021 : тезисы докладов XVIII Международной научной конференции молодых ученых, Минск, 27–30 сентября 2021 г. : в 2 ч. Ч. 2. Медицинские, физико-математические, физико-технические, химические науки и науки о Земле / редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. Минск : Беларуская навука, 2021. С. 255–258.
62. PLA – революция в сфере экопосуды // Ekofriend : производитель экологически чистой упаковки. 2024 [Электронный ресурс]. URL: <https://ekofriend.com/articles/ekoposuda/pla--revolyuciya-v-sfere-ekoposudy> (дата обращения: 20.05.2024).
63. Yoon J. PLA Eco-Friendly 3D printing Filament // To Buy a 3D Printer. 2014 [Электронный ресурс]. URL:

<https://tobuya3dprinter.com/pla-eco-friendly-3d-printing-filament/> (дата обращения: 03.10.2023).

64. Винидиктова Н. С. Экологичные материалы на основе растительного сырья // Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб-2022) : тезисы докладов международной научно-технической конференции, Гомель, 28–30 июня 2022 г. / редкол.: В. Н. Адериха [и др.]. Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2022. С. 72.
65. Конакова О. В., Винидиктова Н. С., Шаповалов В. М., Зотов С. В. Биoutilизируемые композиционные материалы на основе растительного сырья // Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб-2022) : тезисы докладов международной научно-технической конференции, Гомель, 28–30 июня 2022 г. / редкол.: В. Н. Адериха [и др.]. Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2022. С. 86.

References

1. Analiz rynka pererabotki polimernykh otkhodov v Rossii : analiticheskiy otchet [Market analysis of polymer waste recycling in Russia: analytical report] (2022). Available at: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Demo_Analiz_rynka_pererabotki_polimernykh_otkhodov_v_Rossii.pdf (accessed 24 April 2024).
2. Babaeva R. Sustavy, eda i DNK: kakoe mesto zanimayut polimery v sovremennoy zhizni [Joints, food and DNA: what place do polymers occupy in modern life?] (2022). Available at: <https://trends.rbc.ru/trends/innovation/621d65569a7947b826978348> (accessed 18 April 2024).
3. Shapovalov V. M., Grigor'ev A. Ya. Retsikling i utilizatsiya mnogokomponentnykh polimernykh sistem na osnove vtorichnykh termoplastov (obzor) [Recycling and utilization of multicomponent polymer systems based on secondary thermoplastics (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2021, vol. 7, no 3, pp. 6–19. doi: 10.32864/polymmattech-2021-7-3-6-19
4. Shapovalov V. M., Kitikov V. O., Smirnov V. A. Ekologicheskie i ekonomicheskie aspekty ispol'zovaniya vtorichnykh material'nykh resursov v zadachakh ustoychivogo razvitiya v Respublike Belarus' [Environmental and economic aspects of the use of secondary material resources in the tasks of sustainable development in the Republic of Belarus]. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie* [Mine mechanical engineering and machinebuilding], 2023, no. 2, pp. 95–105.
5. Buylova O. Utilizatsiya i pererabotka upakovki [Disposal and recycling of packaging] (2014). Available at: <http://article.unipack.ru/50604/> (accessed 15 April 2024).
6. Rakhimov M. A., Rakhimova G. M., Imanov E. M. Problemy utilizatsii polimernykh otkhodov [Problems of recycling polymer waste]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2014, no. 8-2, pp. 331–334.
7. Geyer R. Production, use, and fate of synthetic polymers. *Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions*. Ed. T. M. Letcher. USA : Academic Press, 2020, pp. 13–32. doi: 10.1016/B978-0-12-817880-5.00002-5
8. Hedayati A., Gholizadeh M., Bagheri T., Abarghouei S., Zamani W. Microplastics in Marine Ecosystems. *Sustainable Aquatic Research*, 2022, vol. 1, no. 2, pp. 63–73. doi: 10.5281/zenodo.7038554
9. Bajt O. From plastics to microplastics and organisms. *FEBS Open bio*, 2021, vol. 11, is. 4, pp. 954–966. doi: 10.1002/2211-5463.13120
10. Zhikhareva V. Global'nye ekologicheskie problemy i puti ikh resheniya [Global environmental problems and ways to solve them] (2022). Available at: <https://plus-one.ru/manual/2022/02/23/globalnye-ekologicheskie-problemy-i-puti-ih-resheniya> (accessed 1 March 2024).
11. Volkova A. V. Rynok utilizatsii otkhodov [Waste recycling market], (2018). Available at: <https://dcenter.hse.ru/data/2018/07/11-1151608260/%D0%A0%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA%20%D1%83%D1%82%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%D0%BE%D1%82%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%202018.pdf> (accessed 21 April 2024).
12. Izuchenie morfologicheskogo sostava kommunal'nykh otkhodov na 20 testovykh ploshchadkakh Belarusi v letniy sezon [Study of the morphological composition of municipal waste at 20 test sites in Belarus in the summer season] (2020). Available at: <https://minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/izuchenie-morfologicheskogo-sostava-kommunalnyx-otkhodov-na-20-testovyx-ploshchadkax-belarusi-v-letnij-sezon-3498/> (accessed 19 April 2024).
13. Shapovalov V. M., Tartakovskiy Z. L. *Mnogokomponentnye polimernye sistemy na osnove vtorichnykh materialov* [Multicomponent polymer systems based on recycled materials]. Gomel : IMMS NANB Publ., 2003. 262 p.
14. Sortirovka musora v Rossii: novovvedeniya, slozhnosti i perspektivy [Waste sorting in Russia: innovations, difficulties and prospects] (2019). Available at: <https://rcycle.net/musor/razdelnyj-sbor/reforma-sortirovki-v-rossii-novovvedeniya-slozhnosti-perspektivy> (accessed 21 April 2024).
15. Kitikov V., Baranovskiy I. Sostoyanie i perspektivy pererabotki polimernykh otkhodov [State and prospects for processing polymer waste]. *Nauka i innovatsii* [The Science and Innovations], 2022, no. 5 (231), pp. 14–16.
16. Chuprova L. V., Mullina E. R., Mishurina O. V., Ershova O. V. Issledovanie vozmozhnosti polucheniya kompozitsionnykh materialov na osnove vtorichnykh polimerov [Study of the possibility of obtaining composite materials based on secondary polymers]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 4. eLIBRARY ID: 22285539
17. Ivanovskiy S. K., Bakhaeva A. N., Ershova O. V., Chuprova L. V. Ekologicheskie aspekty problemy utilizatsii otkhodov polimernoy upakovki i tekhnogennykh mineral'nykh resursov [Environmental aspects of the problem of recycling waste from polymer packaging and technogenic mineral resources]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances of modern natural science], 2015, no. 1-5, pp. 813–817.
18. Zaynullin Kh. N., Abdрахmanov R. F., Ibatullin U. G., Minigazimov I. N., Minigazimov I. S. *Obrashchenie s otkhodami proizvodstva i potrebleniya* [Management of production and consumption waste]. Ufa : Dialog Publ., 2005. 292 p.
19. Sortirovka musora [Garbage sorting] (2022). Available at: <https://zumso.by/%D1%81%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%B0-%D0%BC%D1%83%D1%81%D0%BE%D1%80%D0%B0/> (accessed 15 April 2024).
20. Vorob'eva E. V., Popov A. A. Biorazlagaemye kompozity na osnove iskopaemykh vidov syr'ya. Chast' I. Strategii polucheniya, kharakternye svoystva i razvitiye rynka (obzor) [Biodegradable composites based on fossil raw materials. Part I: Procurement Strategies, Characteristics and Market Development (Review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2022, vol. 8, no. 2, pp. 6–24. doi: 10.32864/polymmattech-2022-8-2-6-24
21. Vorob'eva E. V., Popov A. A. Biorazlagaemye kompozity na osnove iskopaemykh vidov syr'ya. Chast' II: Protsess biodegradatsii (obzor) [Biodegradable composites based on fossil raw materials. Part II: Biodegradation Process (Review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2023, vol. 9, no. 1, pp. 6–22. doi: 10.32864/polymmattech-2023-9-1-6-22
22. Litvyak V. V. Perspektivy proizvodstva sovremennykh upakovochnykh materialov s primeneniem biorazlagaemykh polimernykh kompozitsiy [Prospects for the production of modern packaging materials using biodegradable polymer compositions]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya* [Journal of the Belarusian State University. Ecology], 2019, no. 2, pp. 84–94.
23. Krut'ko E. T., Prokopchuk N. R., Globa A. I. *Tekhnologiya biorazlagaemykh polimernykh materialov: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov vuzov* [Technology of biodegradable polymer materials: educational and methodological manual for university students]. Minsk : BGTU Publ., 2014. 105 p.
24. Vse o biorazlagaemykh plastikakh. Mirovoy rynek biopolimerov – 2019. Chast' 2. [All about biodegradable plastics. World market of biopolymers –

2019. Part 1] (2022). Available at: <https://ect-center.com/blog/biodegradable-polymers> (accessed 3 October 2023).
25. Vikhareva I. N., Zaripov I. I., Kinzybulatova D. F., Minigazimov N. S., Aminova G. K. Biorazлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Част' 1 [Biodegradable polymer materials and modifying additives: current state. Part 1]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve* [Nanotechnology in construction], 2020, vol. 12, no. 6, pp. 320–325. doi: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-320-325
 26. Mazitova A. K., Aminova G. K., Zaripov I. I., Vikhareva I. N. Biorazлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Част' 2 [Biodegradable polymer materials and modifying additives: current state. Part 2]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve* [Nanotechnology in construction], 2021, vol. 13, no. 1, pp. 32–38. doi: 10.15828/2075-8545-2021-13-1-32-38
 27. Sivkova G. A., Khusainova A. A. Poluchenie biorazлагаемого пластика iz vozobnovlyаемого syr'ya [Making biodegradable plastic from renewable raw materials]. *Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Traditsionnaya i innovatsionnaya nauka: istoriya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy»* [Collection of articles of the international scientific and practical conference “Traditional and innovative science: history, current state, prospects”]. Ufa : Aeterna Publ., 2020, ch. 2, pp. 25–30.
 28. European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste (2024). Available at: https://www.ekokom.cz/uploads/attachments/English/Directive%2094_62_EC.pdf (accessed 26 May 2024).
 29. Vse o biorazлагаемом plastike [All about biodegradable plastic] (2024). Available at: <https://www.litoplast.by/blog/vse-o-biorazлагаемом-plastike/> (accessed 15 May 2024).
 30. Tasekeev M. S., Eremeeva L. M. *Proizvodstvo biopolimerov kak odin iz putey resheniya problem ekologii i APK : analiticheskiy obzor* [Production of biopolymers as one of the ways to solve environmental and agricultural problems: analytical review]. Almaty : NTs NTI Publ., 2009. 200 p.
 31. Ermolovich O. A. Biorazлагаемые упakovочные пленки на основе химически модифицированных полиолефинов и крахмалов. Diss. kand. tekh. nauk [Biodegradable packaging films based on chemically modified polyolefins and starches. PhD eng. sci. diss.]. Minsk, 2006. 162 p.
 32. Ermolovich O. A., Vinidiktova N. S., Makarevich A. V., Orekhov D. A. Biorazлагаемые ориентированные плоские волокна на основе крахмалонаполненного полипропилена [Biodegradable oriented flat fibers based on starch-filled polypropylene]. *Khimicheskie volokna* [Chemical fibers], 2006, no. 5, pp. 26–30.
 33. Birbasov V. A., Kas'yanov G. I. Osobennosti tekhnologii biorazрушаемых упakovочных материалов [Features of the technology of biodegradable packaging materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Food technology], 2011, no. 4, pp. 122–123.
 34. Rosato Don. Bioplastiki: tekhnologii, rynek, perspektivy (I chast') [Bioplastics: technologies, market, prospects (Part I)] (2006). Available at: https://newchemistry.ru/letter.php?n_id=1609&cat_id=&sword=%E1%E8%EE%EF%EB%E0%F1%F2%E8%EA%E8 (data obrashcheniya: 03.10.2023).
 35. Biorazлагаемый пластик – разновидности, технология производства, основные свойства [Biodegradable plastic - varieties, production technology, basic properties] (2018). Available at: <https://rcycle.net/plastmassy/biorazлагаемый-пластик-разнообразности-технология-производства-основные-свойства> (accessed 3 October 2023).
 36. Biorazлагаемые полимеры в адгезивных системах (част' 1) [Biodegradable polymers in adhesive systems (part 1)] (2006). Available at: https://newchemistry.ru/letter.php?n_id=3343&cat_id=8&page_id=2 (accessed 3 October 2023).
 37. Vasil'eva N. G. Biorazлагаемые полимеры [Biodegradable polymers]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2013, vol. 16, no. 22, pp. 156–157.
 38. Abramov V. A. Krakhmal [Starch] (2024). Available at: <https://acetyl.ru/o/ez6902.php> (accessed 26 May 2024).
 39. Yanov V. V., Zenitova L. A. *Biorazлагаемые полимеры и полимерные композиции* [Biodegradable polymers and polymer compositions]. Kazan' : KNITU Publ., 2022. 144 p.
 40. Kamada A., Rodriguez-Garcia M., Ruggeri F. S., Shen Yi, Levin A., Knowles T. P. J. Controlled self-assembly of plant proteins into high-performance multifunctional nanostructured films. *Nature communications*, 2021, vol. 12. doi: 10.1038/s41467-021-23813-6
 41. Poddenezhnyy E. N., Boyko A. A., Alekseenko A. A., Drobyshevskaya N. E., Uretskaya O. V. Progress v poluchenii biorazлагаемых композиционных материалов на основе крахмала (obzor) [Progress in obtaining biodegradable starch-based composite materials (review)]. *Vestnik GGTU imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of the P. O. Sukhoi State Technical University of Gornel], 2015, no. 2, pp. 31–41.
 42. Leshina A. Plastiki biologicheskogo proiskhozhdeniya [Biological origin plastics]. *Khimiya i zhizn'* [Chemistry and Life], 2012, no. 9, pp. 2–5.
 43. Suvorova A. I., Tyukova I. S., Trufanova E. I. Biorazлагаемые полимерные материалы на основе крахмала [Biodegradable polymer materials based on starch]. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 2000, vol. 69, no. 5, pp. 494–504.
 44. Pavlenok A. V., Davydova O. V., Drobyshevskaya N. E., Poddenezhnyy E. N., Boyko A. A., Shapovalov V. M. Poluchenie i svoystva biorazлагаемых композиционных материалов на основе поливинилового спирта i крахмала [Preparation and properties of biodegradable composite materials based on polyvinyl alcohol and starch]. *Vestnik GGTU imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of the P. O. Sukhoi State Technical University of Gornel], 2018, no. 1, pp. 38–46.
 45. Ushakov S. N. *Polivinilovyy spirt i ego proizvodnye : v 2 t. vol. 1* [Polyvinyl alcohol and its derivatives: in 2 volumes. Vol. 1]. Moscow ; Leningrad : Akademiya nauk SSSR Publ., 1960. 553 p.
 46. Rybkina S. P., Pakharenko V. V., Bulakh V. Yu., Pakharenko V. A. Biorazлагаемые упakovочные материалы на основе полисахаридов (крахмала) [Biodegradable packaging materials based on polysaccharides (starch)]. *Plasticheskie massy* [Plastics], 2012, no. 2, pp. 61–64.
 47. Rikhter M., Augustat Z., Shirbaum F. *Izbrannye metody issledovaniya krakhmala* [Selected starch research methods]. Moscow : Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1975. 183 p.
 48. Vinidiktova N. S., Ermolovich O. A., Goldade V. A., Pinchuk L. S. Strength of biodegradable PP tapes filled with a modified starch. *Mechanics of Composite Materials*, 2006, vol. 42, no. 3, pp. 273–282. doi: 10.1007/s11029-006-0037-0
 49. Vinidiktova N. S., Gol'dade V. A., Ermolovich O. A., Azizbekyan S. G. Ekologicheski bezopasnyye orientirovannyye plenki na osnove polipropilena [Environmentally friendly oriented films based on polypropylene]. *Materialy, tekhnologii, instrumenty* [Materials, technologies, tools], 2008, vol. 13, no. 4, pp. 14–19.
 50. Ermolovich O. A., Vinidiktova N. S. Strukturno-mekhanicheskie kharakteristiki plenok na osnove polipropilena i khimicheski modifitsirovannogo krakhmala [Structural and mechanical characteristics of films based on polypropylene and chemically modified starch]. *Materialy XXVI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Kompozitsionnyye materialy v promyshlennosti»* [Materials of XXVI International Scientific Conference “Composite materials in industry”]. Kiev, 2006, pp. 395–397.
 51. Vil'danov F. Sh., Latypova F. N., Krasutskiy P. A., Chanyshv R. R. Biorazлагаемые полимеры – современное состояние i perspektivy ispol'zovaniya [Biodegradable polymers – current state and prospects for use]. *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2012, vol. 19, no. 1, pp. 135–139.
 52. Kofman V. Ya. Perspektivnyye napravleniya pererabotki izbytochnogo aktivnogo ila. Poluchenie letuchikh zhirnykh kislot (obzor) [Upcoming trends of processing waste activated sludge. preparation of volatile fatty acids (a review)]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Technique], 2022, no. 1, pp. 51–60. doi: 10.35776/VST.2022.01.08
 53. Gevorkyan E. L., Kordyukova A. P. Mozhet li biorazлагаемый пластик reshit' real'nye ekologicheskie problemy [Can biodegradable plastic

- solve real environmental problems?]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2022, no. 10 (405), pp. 24–26.
54. Myalenko D. M. Biorazlagaemye polimernye materialy dlya upakovki molochnoy i pishchevoy produktsii [Biodegradable polymer materials for packaging dairy and food products]. *Molochnaya promyshlennost'* [Dairy industry], 2020, no. 11, pp. 44–46. doi: 10.31515/1019-8946-2020-11-44-46
55. Bakhaeva A. N., Ivanovskiy S. K. Obzor okso-biorazlagaemykh dobavok ispol'zuemykh dlya utilizatsii upakovochnykh materialov [Review of oxo-biodegradable additives used for recycling packaging materials]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2015, no. 10 (90), pp. 156–158.
56. GOST 33747-2016. Okso-biorazlagaemaya upakovka. Obshchie tekhnicheskie usloviya. [State Standard 33747-2016. Oxo is a biodegradable package. General technical conditions]. Moscow : Standartinform Publ., 2016. 8 p.
57. Fedotova O. B. O biorazlagaemoy upakovke i perspektive ee ispol'zovaniya [About biodegradable packaging and the prospects for its use]. *Molochnaya promyshlennost'* [Dairy industry], 2020, no. 1, pp. 10–12.
58. Leskova S. A. Problemy biodegradatsii poliolefinov na primere polietilena [Problems of biodegradation of polyolefins using the example of polyethylene]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie* [Innovation. The science. Education], 2021, no. 40, pp. 309–315.
59. Bioplastiki: perspektivy v Rossii [Bioplastics: prospects in Russia] (2014). Available at: <https://rupec.ru> (accessed 15 April 2024).
60. Konakova O. V., Timofeenko A. A., Vinidiktova N. S. Dinamika biodegradatsii kompozitsionnykh materialov dlya tary i upakovki [Dynamics of biodegradation of composite materials for packaging and packaging]. *Tezisy dokladov VI Respublikanskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh «Novye funktsional'nye materialy, sovremennye tekhnologii i metody issledovaniya»* [Abstracts of the VI Republican Scientific and Technical Conference of Young Scientists “New functional materials, modern technologies and research methods”]. Gomel' : IMMS NAN Belarusi Publ., 2020, pp. 102–103.
61. Konakova O. A., Vinidiktova N. S. Biorazlagaemye materialy bytovogo naznacheniya: opyt i perspektivy razrabotok [Biodegradable household materials: experience and development prospects]. *Tezisy dokladov XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh «Molodezh' v nauke – 2021»* [Abstracts of the XVIII International Scientific Conference of Young “Scientists Youth in Science – 2021”]. Minsk : Belaruskaya navuka Publ., 2021, part 2, pp. 255–258.
62. PLA – revolyutsiya v sfere ekoposudy [PLA – revolution in eco-ware] (2024). Available at: <https://ekofriend.com/articles/ekoposuda/pla-revolyuciya-v-sfere-ekoposudy> (accessed 20 May 2024).
63. Yoon J. PLA Eco-Friendly 3D printing Filament (2014). Available at: <https://tobuya3dprinter.com/pla-eco-friendly-3d-printing-filament/> (accessed 3 October 2023).
64. Vinidiktova N. S. Ekologichnyye materialy na osnove rastitel'nogo syr'ya [Eco-friendly materials based on plant raw materials]. *Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Polimernye kompozity i tribologiya» (Polikomtrib-2022)* [Abstracts of the international scientific and technical conference “Polymer Composites and Tribology” (Polycomtrib-2022)]. Gomel' : IMMS NAN Belarusi Publ., 2022, pp. 72.
65. Konakova O. V., Vinidiktova N. S., Shapovalov V. M., Zotov S. V. Bioutiliziruemye kompozitsionnye materialy na osnove rastitel'nogo syr'ya [Biorecyclable composite materials based on vegetable raw materials]. *Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Polimernye kompozity i tribologiya» (Polikomtrib-2022)* [Abstracts of the international scientific and technical conference “Polymer Composites and Tribology” (Polycomtrib-2022)]. Gomel' : IMMS NAN Belarusi Publ., 2022, pp. 86.