Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 4 / 2025, Vol. 17, Iss. 4 https://esj.today/issue-4-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/61NZVN425.pdf

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Сергеев, О. Е. Комплексная оценка биоразложения полимеров в различных условиях окружающей среды и разработка математической модели процесса / О. Е. Сергеев, К. А. Вельможина, Н. А. Политаева, В. Л. Баденко, Н. В. Румянцева // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 4. — URL: https://esj.today/PDF/61NZVN425.pdf.

For citation:
Sergeev O.E., Velmozhina K.A., Politaeva N.A., Badenko V.L., Rumyantseva N.V. Comprehensive assessment of polymer biodegradation under various environmental conditions and development of a mathematical model of the process. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(4): 61NZVN425. Available at: https://esj.today/PDF/61NZVN425.pdf. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 691.175

Сергеев Олег Евгеньевич
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Аспирант
E-mail: ole13g@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1072490

Вельможина Ксения Алексеевна
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Инженер
E-mail: anizhomlev@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9623-057X
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1232788
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58419740600

Политаева Наталья Анатольевна
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Профессор
Доктор технических наук, профессор
E-mail: politaevana1971@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5914-6210
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=439213
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57210316571

Баденко Владимир Львович
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Профессор
Доктор технических наук, доцент
E-mail: badenko_vl@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3054-1786
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=131728
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6508255564

Румянцева Нина Вячеславовна
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Доцент
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: Rumyantseva_nv@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5045-6282
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=536365
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57210920516

Комплексная оценка биоразложения полимеров в различных условиях окружающей среды и разработка математической модели процесса

Аннотация. В условиях экологического кризиса, вызванного масштабным загрязнением окружающей среды пластиковыми отходами, актуальность проблемы их утилизации и биоразложения приобретает первостепенное значение. Учитывая, что синтетические полимеры способны сохраняться в природе столетиями, накапливаясь в почве и водоемах и создавая серьезную угрозу экосистемам, было проведено комплексное исследование биоразложения полимерных упаковочных материалов, представленных в торговых сетях. Объектом исследования стали образцы полимерной упаковки, представленные в известных торговых сетях Российской Федерации. Процесс биоразложения был рассмотрен в различных условиях окружающей среды: стандартные (комнатные) условия, условия по ГОСТ Р 57219-2016 и условия по ГОСТ Р 58830-2020. Морфологические изменения поверхности образцов оценивались по результатам сканирующей электронной микроскопии, химические изменения — по результатам инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье. Предложена эмпирическая модель оценки результатов биоразложения X, устанавливающая условный показатель степени биоразложения образца с учетом температуры окружающей среды, а также влажности и концентрации микроорганизмов в почве. Показатель X приводится в условных единицах и является относительным. Данный показатель используется для сравнительного анализа процесса биоразложения образцов в заданных условиях окружающей среды. В ходе исследования выявлено, что наиболее благоприятными для процесса биоразложения образцов упаковки являются условия, регламентированные ГОСТ Р 58830-2020. Полученные результаты имеют практическое значение для совершенствования системы управления отходами. Исследование вносит вклад в решение проблемы загрязнения окружающей среды пластиковыми отходами путем разработки методологии оценки биоразложения полимерных материалов в различных условиях окружающей среды.

Ключевые слова: полимер; пластик; биопластик; биоразложение; грунт; полимерная упаковка; инфракрасная спектроскопия; микроскопия; математическое моделирование

Введение

Проблема загрязнения окружающей среды пластиковыми отходами приобретает всё большую актуальность в условиях роста потребления полимерных материалов и ограниченности ресурсов для их размещений и утилизации. Традиционные синтетические полимеры, такие как полиэтилен, полипропилен и полиэтилентерефталат, могут сохраняться в окружающей среде столетиями, что связано с длительным периодом их биоразложения [1]. Одним из наиболее перспективных подходов к сокращению накопления пластиковых отходов и снижению связанных с этим экологических рисков является внедрение биоразлагаемых полимеров и изучение скорости их разложения [2; 3]. Скорость биоразложения во многом зависит от условий окружающей среды, при этом значительную роль играют такие факторы, как температура, концентрация субстрата, кислород, давление и структура микробного сообщества. Взаимодействие этих факторов приводит к тому, что скорость биоразложения, наблюдаемая в лабораторных условиях, может значительно отличаться от скорости в реальных условиях [4; 5].

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки комплексной оценки биоразложения полимеров в различных условиях окружающей среды. Это позволит проводить сравнительный анализ степени изменений различных полимерных материалов при разных условиях среды.

61NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Научная новизна работы заключается в предложении эмпирической модели оценки результатов биоразложения *X*, которая вводит условный показатель степени биоразложения образца полимеров, учитывающий влияние температуры, влажности и состава микробной флоры.

Следует отметить, что данный показатель не является физически измеряемой величиной и предназначен для сравнительной оценки изменений между различными условиями компостирования.

Таким образом, цель исследования — определение наиболее эффективных условий биоразложения образцов упаковки, представленной в известных торговых сетях, а также предложение расчетного интегрального показателя для сравнительной оценки степени биоразложения упаковки в разных условиях окружающей среды.

Для достижения поставленной цели будут решены следующие задачи:

1. Провести серию экспериментов по биоразложению шести типов упаковок в стандартных условиях, в условиях ГОСТ Р 57219-2016 и в условиях ГОСТ Р 58830-2020.
2. Оценить морфологические изменения поверхности образцов методом сканирующей электронной микроскопии, определить коэффициент визуального разложения *b*.
3. Провести ИК-Фурье спектроскопию для вычисления коэффициентов пропускания k_i и количественной оценки химических изменений.
4. Предложить эмпирическую модель оценки результатов биоразложения *X(t)*, устанавливающая условный показатель степени биоразложения образца с учетом температуры окружающей среды, а также влажности и концентрации микроорганизмов в почве.
5. Вычислить показатель *X* для каждого образца.
6. Определить наиболее эффективные условия окружающей среды для биоразложения полимерных упаковочных материалов, широко применяемых в торговых сетях Российской Федерации.

Объекты исследования

В качестве объектов исследования рассматриваются образцы полимерных упаковочных материалов, широко применяемых в торговых сетях Российской Федерации (сети магазинов «О’кей», «ЗооОптТорг.рф», «Магнит», «АШАН», «Улыбка радуги», «Пятёрочка»); информация о составе и характеристиках этих образцов получена из открытых источников, включая маркировку продукции и данные, предоставленные производителями и представлена в таблице 1.

Важным является уточнение о том, что определение точного состава изучаемых образцов является сложной трудоемкой задачей и на данном этапе исследования не является первостепенной целью.

В таблице 1 указаны названия материалов, предлагаемые производителями, однако состав того или иного образца не указан ни в одном случае.

Таким образом предположим, что все изучаемые на данном этапе образцы являются синтетическими полимерами.

Условия проведения экспериментов с описанием параметров окружающей среды представлены в таблице 2.

61NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Таблица 1

Объекты исследования

№ образца	Тип образца / торговая сеть	Маркировка изделия (от производителя)	Указания по биоразлагаемости (от производителя)
1	биопластиковый пакет О'КЕЙ / сеть магазинов «О'кей»	полиэтилен низкой плотности высокого давления (04 *PE-LD*) + добавка *Polimateria*	биоразложение в течение 1 года
2	биопластиковый пакет ЗооОптТорг / сеть магазинов «ЗооОптТорг.рф»	не указана (предположительно полиэтилен низкой плотности высокого давления (04 *PE-LD*))	биоразложение в течение 2 лет (информация, указанная на пакете)
3	биопластиковый пакет *BiG* / сеть магазинов «Магнит»	полиэтилен низкого давления (ПНД) с оксодобавкой *d2w*	биоразложение в течение 1–2 лет
4	полиэтиленовый (целлофановый) пакет / сеть магазинов «АШАН»	полиэтилен низкой плотности высокого давления (04 *PE-LD*)	информация отсутствует
5	мешки для мусора ВыгоДа! / сеть магазинов «Улыбка радуги»	полиэтилен низкого давления (ПНД)	информация отсутствует
6	пластиковая бутылка Красная цена / сеть магазинов «Пятёрочка»	полиэтилентерефталат (01 *PETE*)	информация отсутствует

Разработано авторами на основе данных от производителей

Таблица 2

Условия проведения экспериментов по изучению процесса биоразложения полимерных материалов

Длительность	112 суток	45 суток	112 суток
Температура	23 ±2°C	58 ±2°C	26 ±5°C
Влажность воздуха	50 ±5 %	50 ±5 %	60–90 %
Влажность грунта	60 ±5 %	65 %	60 ±20 %
Наличие освещения	+	+	-
Наличие кислорода	+	+	+
Условия	**Стандартные условия**	**Условия по ГОСТ Р 57219-2016**	**Условия по ГОСТ Р 58830-2020**
Грунт	плодородный грунт со следующим составом: смесь торфов (верхового и низинного), песок, доломитовая мука, комплексное минеральное удобрение; содержание азота (N) ≥ 300 мг/кг, фосфора (P_2O_5) ≥ 500 мг/кг, калия (K_2O) ≥ 600 мг/кг, pH 6,0–7,0	зрелый компост из смеси древесной стружки, экскрементов скота, инертного материала и деионизированной воды (1 часть инокулята / 5 частей воды), подвергнутый аэробному компостированию в течение 2 месяцев и просеянный через сито с ячейками 7,0 < pH < 9,0	плодородный грунт со следующим составом: торфо низинный, торф верховой, песок, известняковая (доломитовая) мука, Азофоска; содержание азота (N) 150–350 мг/л, фосфора (P_2O_5) ≥ 30 мг/л, калия (K_2O) ≥ 250–400 мг/л, pH 5,5–6,5

Разработано авторами

Для количественной оценки химических изменений в полимерных образцах в ходе биоразложения применяется инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (далее ИК-Фурье спектроскопия), которая фиксирует интенсивность поглощения в определённых диапазонах волн, характерных для ключевых функциональных групп. Оценка спектральных характеристик образцов полимерных материалов будет осуществляться на основе коэффициентов пропускания (k_i) в ключевых диапазонах поглощения инфракрасного спектра,

61NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

соответствующих различным функциональным группам.[1] Предлагаемый метод конвертации процентного пропускания T% в параметр (k_i) основан на простой линейной нормировке в диапазонах длин волн 3300–3500 см$^{-1}$, 2800–3000 см$^{-1}$, 1700–1750 см$^{-1}$ и 1000–1300 см$^{-1}$. По этому подходу (k_i) определяется как k_i = 1 - (T%/100), где k принимает значения в интервале [0, 1], при этом минимальное пропускание соответствует k_i = 1, а максимальное — k_i = 0. Такая нормировка обеспечивает прямую связь между измеряемым процентом пропускания и величиной, экспонирующей сопротивляемость материала к свету в заданном диапазоне. Для оценки морфологии поверхности и микроструктуры образцов применялась сканирующая электронная микроскопия. Микроскопия выполнялась на термоэмиссионном микроскопе *JEOL JSM 7001F* при оптическом увеличении ×10.

Результаты

Введем следующие коэффициенты для составления математической модели биоразложения:

X — показатель биоразложения материала;

b — коэффициент визуального разложения (определяется по шкале от 0 до 1 с шагом 0,25 на основе детального анализа микроскопических изображений [6], где 0 соответствует отсутствию изменений, а 1 — полному разрушению материала);

$k_{3300–3500}$, $k_{2800–3000}$, $k_{1700–1750}$, $k_{1000–1300}$ — коэффициенты пропускания материала на ИК-спектрах, связанные с разрушением полимерных связей.[2] (Для расчета k_i использованы четыре спектральных региона: k3300–3500 — валентные колебания O–H/N–H; k2800–3000 — валентные колебания C–H; k1700–1750 — карбонильные группы C=O; k1000–1300 — колебания C–O/C–N);

∂ — коэффициент скорости биоразложения, зависящий от окружающей среды;

t — время эксперимента в сутках;

$e^{-\partial t}$ — экспоненциальный член, учитывающий замедление разложения со временем [7].

Коэффициент скорости биоразложения ∂ зависит от температуры, влажности, состава среды и концентрации микроорганизмов. Учитывая эти параметры, можно выразить его как:

$$\partial = \partial_0 * \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\alpha} * \left(\frac{W}{W_0}\right)^{\beta} * \left(\frac{M}{M_0}\right)^{\gamma}, \quad (1)$$

где:

∂_0 — базовый коэффициент биоразложения, мы предлагаем использовать значение ∂_0 = 0,02 сут$^{-1}$ (2 % разложения в сутки) [8; 9];

T — температура среды (°C), T_0 = 25°C — начальная температура;

W — влажность почвы (%), W_0 = 50 % — начальная влажность;

M — концентрация микроорганизмов (количество клеток на грамм среды);

M_0 — эталонная концентрация, число клеток в исследуемой почве определялось методом посева на питательную среду, M = 1,2M_0;

[1] Методы исследования современных полимерных материалов: Составитель: Замышляева О.Г. Учебно-методическое пособие. — Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. — 90 с.

[2] How to Interpret FTIR Results: A Beginner's Guide. URL: https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=2756 (дата обращения: 21.04.2025).

61NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

α, β, γ — эмпирические коэффициенты, зависящие от типа среды, мы предлагаем использовать $\alpha = 0{,}1$, $\beta = 0{,}2$, $\gamma = 0{,}3$. Эмпирические показатели чувствительности скорости биоразложения к основным факторам окружающей среды (α, β, γ) отражают тот факт, что изменение каждого из этих параметров даёт нелинейный степенной эффект на кинетику процесса [10–14].

Таким образом, показатель биоразложения можно представить в виде следующей формулы:

$$X = \frac{b*(1-e^{-\partial t})}{0{,}01+\Sigma\, k_i}, \quad (2)$$

где:

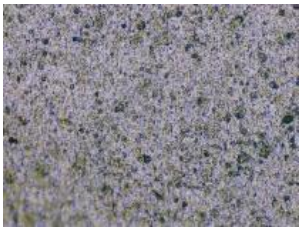
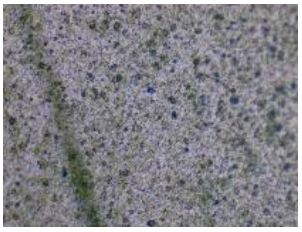
$\Sigma\, k_i$ — сумма *коэффициентов* $k_{3300-3500} + k_{2800-3000} + k_{1700-1750} + k_{1000-1300}$;

0,01 — константа для нормализации результата и предотвращения деления на ноль при малых значениях коэффициентов.

Результаты микроскопии каждого из образцов до и после проведения экспериментов с кратким описанием изменений их поверхности представлены в таблицах 3–8.

Таблица 3

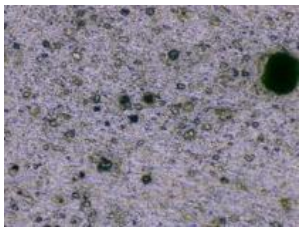
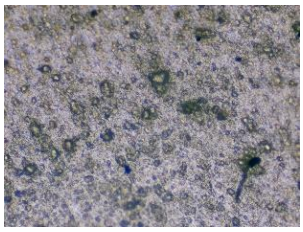
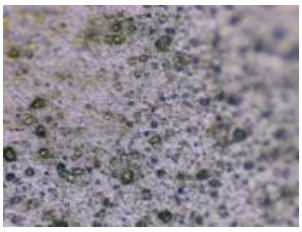
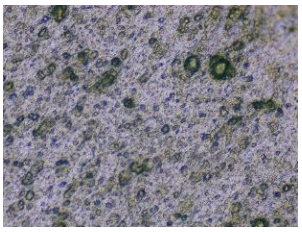
Результаты микроскопии образца № 1

			
1) до биоразложения[1]	2) после биоразложения в стандартных условиях[2]	3) после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016[3]	4) после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 58830-2020[4]

[1] однородная, гладкая поверхность без видимых дефектов, отсутствуют трещины и эрозия; [2] мелкие единичные микроцарапины и микроуступы на отдельных участках складок, общая целостность сохранена; [3] шероховатость поверхности, появление нескольких микротрещин в зоне изгибов, первые неглубокие эрозионные очаги; [4] умеренная сеть трещин, локальная растрескиваемость, образование микропор (~5–10 μм), общая плёнка всё ещё цела. Разработано авторами

Таблица 4

Результаты микроскопии образца № 2

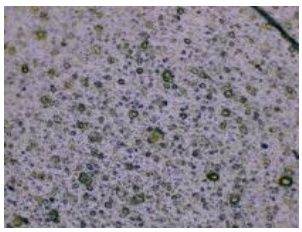
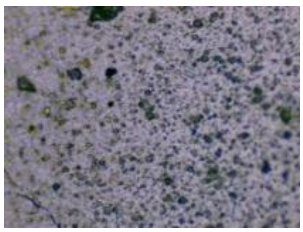
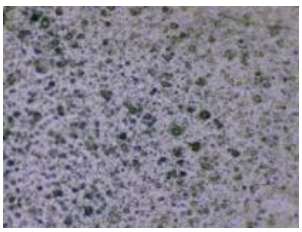
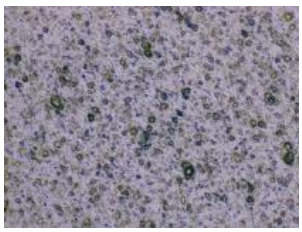
			
1) до биоразложения[1]	2) после биоразложения в стандартных условиях[2]	3) после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016[3]	4) после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 58830-2020[4]

[1] поверхность гладкая, ровная, без видимых дефектов или шероховатости; [2] единичные микроуступы вдоль тиснённых участков, поверхностная матовость, без серьёзных трещин; [3] слабо выраженные тонкие трещинки в складках, появление мелких эрозионных впадин (до 5 μм); [4] расширенная сеть тонких трещин (улицы трещин), начало микропористости (~5–15 μм), поверхность более мятая. Разработано авторами

61NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Таблица 5

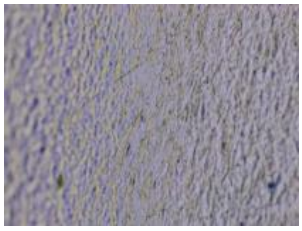
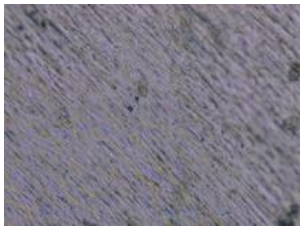
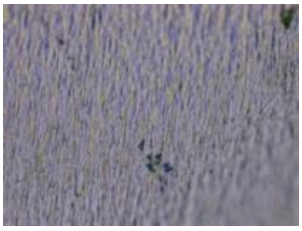
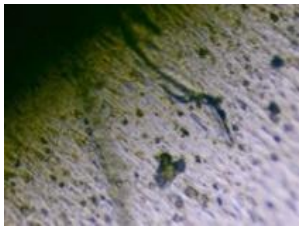
Результаты микроскопии образца № 3

			
1) до биоразложения[1]	2) после биоразложения в стандартных условиях[2]	3) после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016[3]	4) после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 58830-2020[4]

[1] ровная, слегка шероховатая текстура (небольшая зернистость от производства), без трещин; [2] появление неглубоких трещин (до 10 μм) в зонах напряжений, слабая матовость; [3] выраженная растрескиваемость, микропоры (5–20 μм), участки обнажённого матрикса; [4] глубокие трещины (> 20 μм), крупная микропористость (10–30 μм), частичное отслаивание слоёв. Разработано авторами

Таблица 6

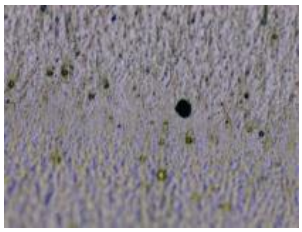
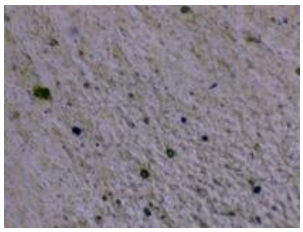
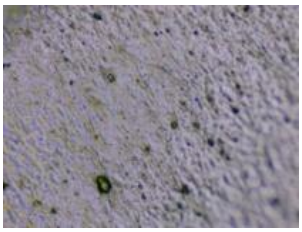
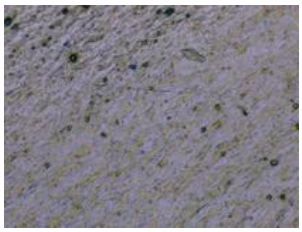
Результаты микроскопии образца № 4

			
1) до биоразложения[1]	2) после биоразложения в стандартных условиях[2]	3) после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016[3]	4) после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 58830-2020[4]

[1] гладкая, блестящая поверхность без дефектов, отсутствуют трещины и шероховатость; [2] единичные микроцарапины, слабая матовость, поверхность почти цела; [3] единичные микроуступы и точечные ямки до 10 μм, начало неглубокой эрозии; [4] единичные неглубокие трещины, локальные впадины до 10 μм, минимальная пористость. Разработано авторами

Таблица 7

Результаты микроскопии образца № 5

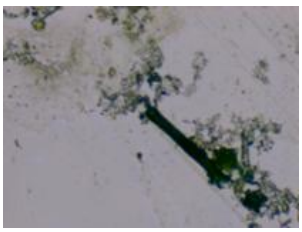
			
1) до биоразложения[1]	2) после биоразложения в стандартных условиях[2]	3) после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016[3]	4) после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 58830-2020[4]

[1] равномерная поверхность без микроцарапин и шероховатости; [2] умеренная матовость, единичные микротрещины (< 10 μм), локальные очаги поверхностной эрозии; [3] слабые сети микротрещин, микропоры (~5–15 μм), поверхность местами рыхлая; [4] единичные неглубокие трещины, локальные впадины до 10 μм, минимальная пористость. Разработано авторами

61NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Таблица 8

Результаты микроскопии образца № 6

			
1) до биоразложения[1]	2) после биоразложения в стандартных условиях[2]	3) после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016[3]	4) после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 58830-2020[4]

[1] гладкая поверхность без дефектов, равномерная глянцевая структура; [2] поверхность не изменилась, отсутствуют видимые дефекты; [3] точки минимальных микроцарапин, отсутствие трещин; [4] единичные микроуступы, несколько точечных впадин (< 5 μм), в целом поверхность цела. Разработано авторами

На основании описанных изменений поверхности был оценен коэффициент визуального разложения b для каждого образца (табл. 9), где 0 — отсутствие изменений, 0,25 — минимальные видимые признаки (единичные микроцарапины, микроуступы), 0,50 — умеренные изменения (сети мелких трещин, неглубокие эрозионные участки), 0,75 — выраженные нарушения целостности (растрескиваемость, микропоры), 1,00 — полное разрушение поверхности, был оценен коэффициент визуального разложения b для каждого образца.

При этом, b_1 — коэффициент визуального разложения в стандартных условиях, b_2 — коэффициент визуального разложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016, b_3 — коэффициент визуального разложения в условиях по ГОСТ Р 558830-2020.

Таблица 9

Коэффициент визуального разложения b для каждого образца после биоразложения

№ образца	b_1	b_2	b_3
1	0,25	0,50	0,75
2	0,25	0,50	0,75
3	0,50	0,75	0,75
4	0,25	0,50	0,50
5	0,25	0,50	0,50
6	0,00	0,25	0,25

Разработано авторами

Для оценки химических изменений в структуре полимерных образцов после проведения эксперимента биоразложения был выполнен анализ инфракрасных спектров поглощения методом ИК-Фурье спектроскопии. ИК-спектры образцов представлены на рисунках 1–6.

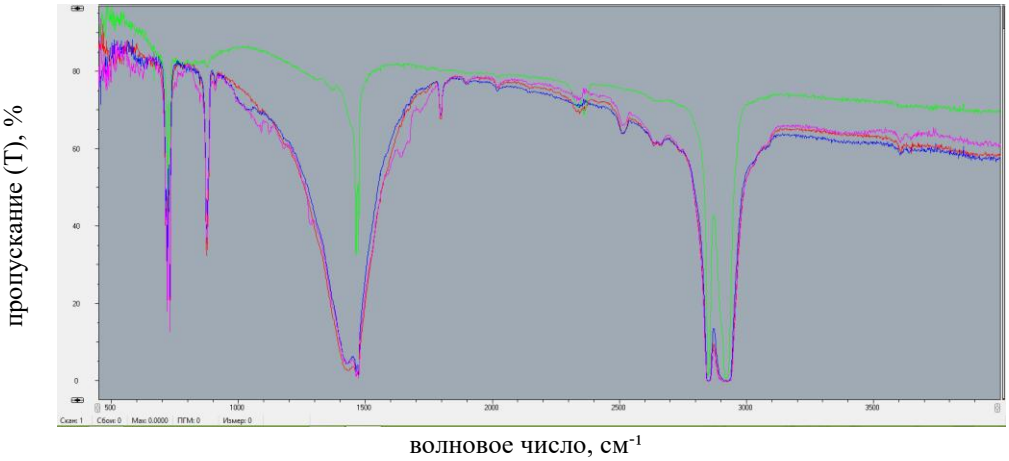
Далее произведем расчёт k_i. Для каждого диапазона длины волны (3300–3500 см$^{-1}$, 2800–3000 см$^{-1}$, 1700–1750 см$^{-1}$, 1000–1300 см$^{-1}$) берём процент пропускания T% внутри диапазона.

По заданному условию минимальное пропускание соответствует $k = 1$, максимальное пропускание — $k = 0$. В рамках исследования предполагается линейная зависимость между T% и k: чем выше пропускание (T%), тем ниже k.

Формула: k = 1 - (T% / 100).

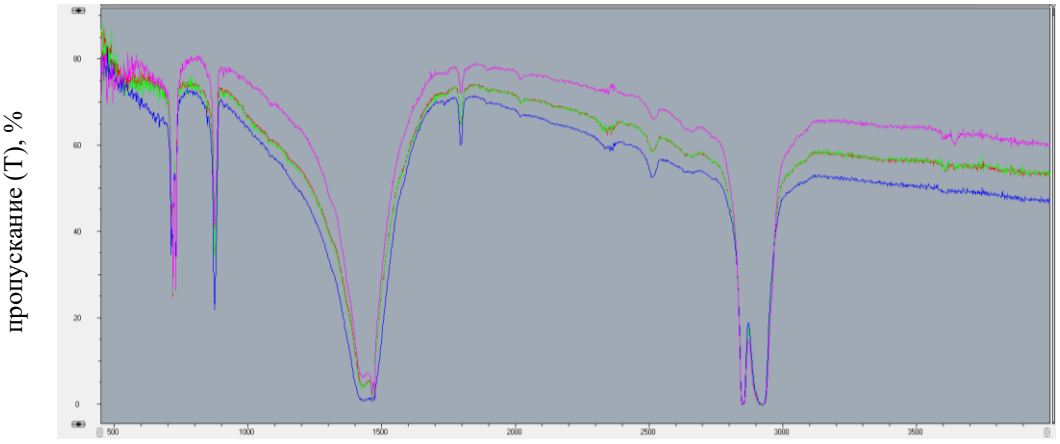
Результаты расчета коэффициента k_i представлены в таблице 10.

61NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com



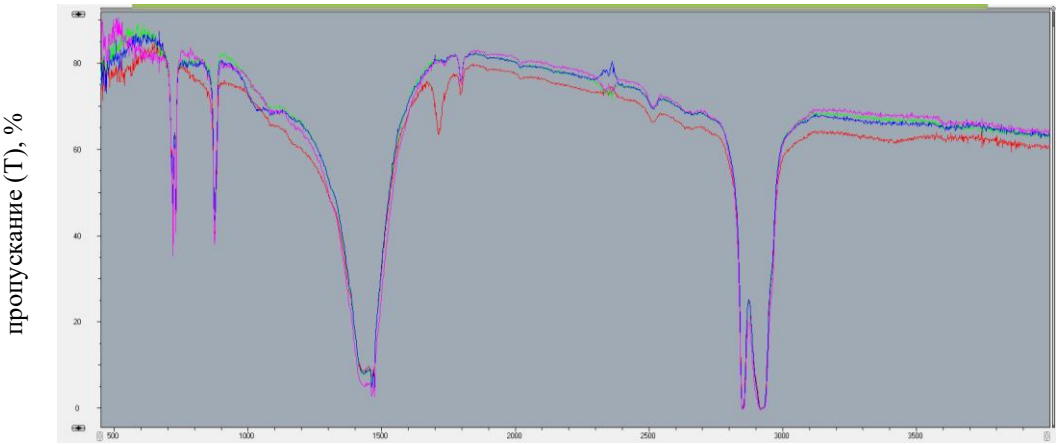
● — *ИК-спектр образца до биоразложения;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в стандартных условиях;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 58830-2020*

Рисунок 1. *ИК-спектр образца № 1 (разработано авторами)*



● — *ИК-спектр образца до биоразложения;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в стандартных условиях;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 58830-2020*

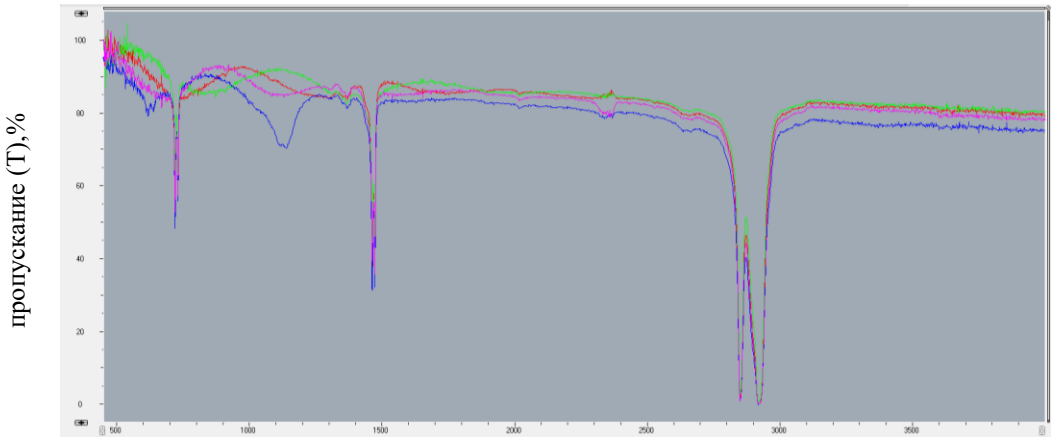
Рисунок 2. *ИК-спектр образца № 2 (разработано авторами)*



● — *ИК-спектр образца до биоразложения;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в стандартных условиях;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 58830-2020*

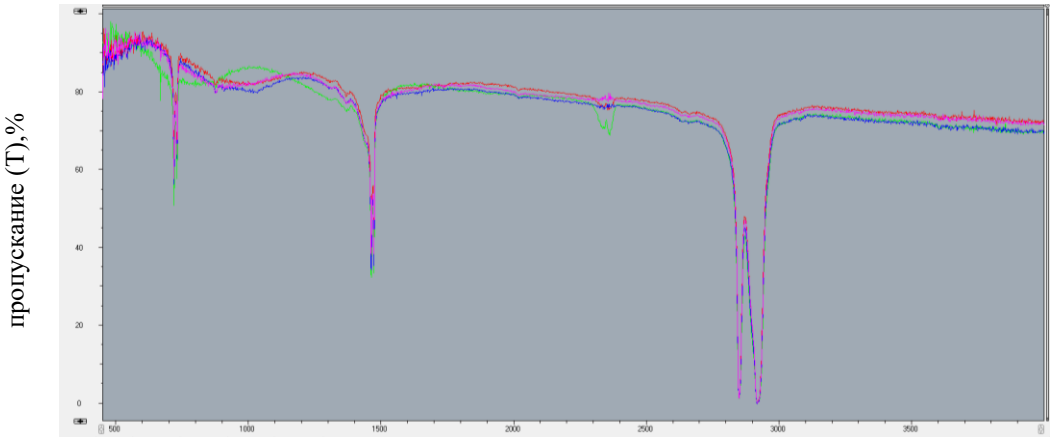
Рисунок 3. *ИК-спектр образца № 3 (разработано авторами)*

61NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com



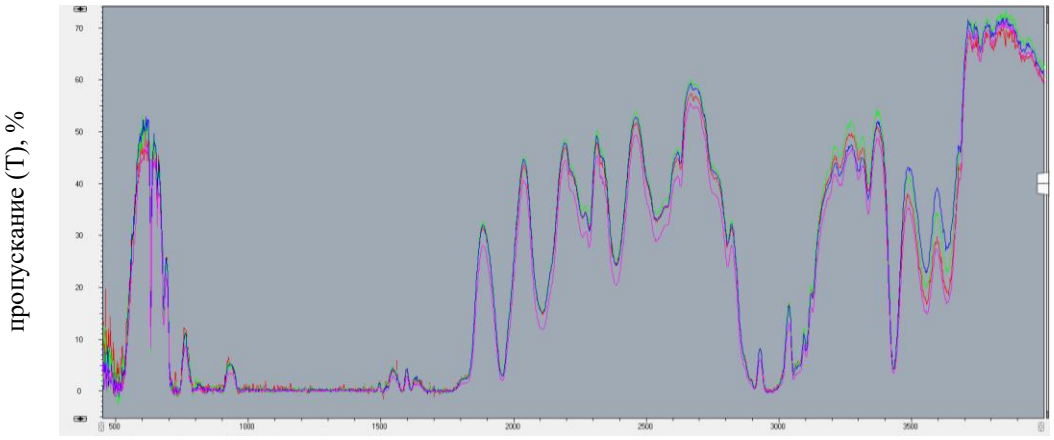
● — *ИК-спектр образца до биоразложения;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в стандартных условиях;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 58830-2020*

Рисунок 4. *ИК-спектр образца № 4 (разработано авторами)*



● — *ИК-спектр образца до биоразложения;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в стандартных условиях;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 58830-2020*

Рисунок 5. *ИК-спектр образца № 5 (разработано авторами)*



● — *ИК-спектр образца до биоразложения;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в стандартных условиях;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 57219-2016;* ● — *ИК-спектр образца после биоразложения в условиях по ГОСТ Р 58830-2020*

Рисунок 6. *ИК-спектр образца № 6 (разработано авторами)*

61NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Таблица 10

Коэффициенты пропускания k_i для каждого образца

№ образца	$k_{3300–3500}$	$k_{2800–3000}$	$k_{1700–1750}$	$k_{1000–1300}$
биоразложение в стандартных условиях				
1	0,42	0,68	0,35	0,60
2	0,50	0,70	0,48	0,50
3	0,38	0,69	0,35	0,45
4	0,23	0,68	0,22	0,28
5	0,21	0,58	0,20	0,19
6	0,65	0,85	0,95	1
биоразложение в условиях по ГОСТ Р 57219-2016				
1	0,43	0,69	0,34	0,59
2	0,47	0,68	0,46	0,48
3	0,37	0,68	0,34	0,44
4	0,22	0,66	0,21	0,20
5	0,22	0,59	0,21	0,20
6	0,64	0,84	0,94	1
биоразложение в условиях по ГОСТ Р 58830-2020				
1	0,43	0,68	0,35	0,60
2	0,47	0,68	0,46	0,48
3	0,37	0,68	0,34	0,44
4	0,22	0,66	0,21	0,17
5	0,21	0,58	0,20	0,19
6	0,64	0,84	0,94	1

Разработано авторами

Таким образом, согласно предложенной формуле, степень биоразложения изученных образцов была вычислена по формуле 2. Исходные условия представлены в таблице 11.

Таблица 11

Исходные параметры для математического моделирования процесса биоразложения в 3 различных условиях

Параметр/условия	Стандартные условия	Условия по ГОСТ Р 57219-2016	Условия по ГОСТ Р 58830-2020
∂_0, сут$^{-1}$	0,02	0,02	0,02
T, °C	25	58	26
T_0, °C	25	25	25
W среды, %	60	65	75
W_0, %	50	50	50
α	0,1	0,1	0,1
β	0,2	0,2	0,2
γ	0,3	0,3	0,3
t, сут	112	45	112
∂, сут$^{-1}$	0,0219	0,0305	0,0230

Разработано авторами

Результаты расчетов представлены в таблице 12.

Таблица 12

Степень биоразложения изученных образцов

№ образца	X в стандартных условиях	X в условиях по ГОСТ Р 57219-2016	X в условиях по ГОСТ Р 58830-2020
1	0,110	0,181	0,335
2	0,104	0,178	0,330
3	0,243	0,304	0,376
4	0,161	0,287	0,364
5	0,192	0,303	0,388
6	0,000	0,054	0,067

Разработано авторами

61NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Таким образом, по результатам биоразложения образцов полимерных упаковочных материалов, представленных в торговых сетях Российской Федерации, было установлено следующее:

1. Наиболее эффективными условиями для биоразложения изученных полимерных упаковочных материалов являются условия по ГОСТ Р 58830-2020.
2. Наименее эффективными условиями для биоразложения изученных полимерных упаковочных материалов являются стандартные (комнатные) условия.
3. Образец № 5 (мешки для мусора ВыгоДа! из сети магазинов «Улыбка радуги») оказался подверженный наибольшему биоразложению в условиях по ГОСТ Р 58830-2020, показатель биоразложения в данных условиях у образца № 5 составил 0,388.
4. С учетом результатов, полученных в каждом из поставленных экспериментов, образец № 3 оказался подверженным наибольшему биоразложению в стандартных условиях (X = 0,243), а также в условиях по ГОСТ Р 57219-2016 (X = 0,304). В данном случае также можно сделать вывод о влиянии оксодобавки d2w, ускорившей процесс биоразложения данного образца во всех условиях.
5. Образец № 6 (пластиковая бутылка Красная цена из сети магазинов «Пятёрочка») продемонстрировал наименьшую активность биоразложения во всех трёх условиях.

Заключение

В ходе проведенных экспериментов было установлено, что условиях биоразложения полимерных материалов по ГОСТ Р 58830-2020 являются наиболее эффективными. Таким образом, компостирование полимерных материалов в течение 112 суток, при температуре воздуха +26 ±5°C, влажности воздуха 60–90 %, влажности почвы 60 ±20 %, а также при отсутствии естественного освещения может быть рекомендовано для реализации эффективного процесса биоразложения полимерных отходов.

Разработанная эмпирическая модель оценки результатов биоразложения *X*, устанавливающая условный показатель степени биоразложения образца с учетом температуры окружающей среды, а также влажности и концентрации микроорганизмов в почве, имеет потенциал для широкого применения. В частности, модель может служить инструментом для оценки эффективности разложения других полимерных упаковок и/или альтернативных условий компостирования и разложения, а также использоваться для сравнительного анализа материалов при разных сценариях утилизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Guerrero L.A. Solid waste management challenges for cities in developing countries / L.A. Guerrero, G. Maas, W. Hogland // Waste Management. — 2013. — Т. 33, № 1. — С. 220–232. — DOI: 10.1016/j.wasman.2012.09.008.
2. Сергеев О.Е. Обзор стратегий производства биопластиков как наиболее экологически устойчивой альтернативы традиционным пластикам / О.Е. Сергеев, К.А. Вельможина, Н.А. Политаева // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16, № 1. — DOI: 10.15862/32NZVN124.

3. Сергеев О.Е. Разработка биопластика на основе хитозана, биомассы микроводорослей и глицерина / О.Е. Сергеев, Н.А. Политаева, К.А. Вельможина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. — 2024. — Т. 13, № 2(66). — С. 227–234.

4. Pischedda A. Biodegradation of plastics in soil: The effect of temperature / A. Pischedda, M. Tosin, F. Degli-Innocenti // Polymer Degradation and Stability. — 2019. — Т. 170. — С. 109017.

5. Liu G. Impact of atmospheric pressure variations on aerobic biodegradation test / G. Liu [и др.] // Waste Management & Research. — 2023. — Т. 41, № 10. — С. 1559–1569.

6. Krieg T. Material Analysis and a Visual Guide of Degradation Phenomena in Historical Synthetic Polymers as Tools to Follow Ageing Processes in Industrial Heritage Collections / T. Krieg, C. Mazzon, E. Gómez-Sánchez // Polymers. — 2022. — Т. 14, № 1. — С. 121. — DOI: 10.3390/polym14010121.

7. Dragomir T.L. An Empirical Model for Predicting Biodegradation Profiles of Glycopolymers / T.L. Dragomir, A.M. Pană, V. Ordodi [и др.] // Polymers. — 2021. — Т. 13, № 11. — С. 1819. — DOI: 10.3390/polym13111819.

8. Kamaly N. Degradable Controlled-Release Polymers and Polymeric Nanoparticles: Mechanisms of Controlling Drug Release / N. Kamaly, B. Yameen, J. Wu, O.C. Farokhzad // Chemical Reviews. — 2016. — Т. 116, № 4. — С. 2602–2663. — DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00346.

9. El-Khordagui L.K. Application of biosurfactants in the production of personal care products, and household detergents and industrial and institutional cleaners / L.K. El-Khordagui, S.E. Badawey, L.A. Heikal // Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science. — 2021. — DOI: 10.1016/b978-0-12-823380-1.00005-8.

10. Tokiwa Y. Biodegradability and biodegradation of poly(lactide) / Y. Tokiwa, B. Calabia // Applied Microbiology and Biotechnology. — 2006. — Т. 72. — С. 244–251. — DOI: 10.1007/s00253-006-0488-1.

11. Mohanan N. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics / N. Mohanan, Z. Montazer, P.K. Sharma, D.B. Levin // Frontiers in Microbiology. — 2020. — Т. 11. — С. 580709. — DOI: 10.3389/fmicb.2020.580709.

12. Fan P. A Review on the Occurrence and Influence of Biodegradable Microplastics in Soil Ecosystems: Are Biodegradable Plastics Substitute or Threat? / P. Fan, H. Yu, B. Xi, W. Tan // Environment International. — 2022. — Т. 163. — С. 107244. — DOI: 10.1016/j.envint.2022.107244.

13. Silva R.R.A. Biodegradation of Polymers: Stages, Measurement, Standards and Prospects / R.R.A. Silva, C.S. Marques, T.R. Arruda, S.C. Teixeira, T.V. de Oliveira // Macromol. — 2023. — Т. 3, № 2. — С. 371–399. — DOI: 10.3390/macromol3020023.

14. Rossetti I. Kinetic Modelling of Biodegradability Data of Commercial Polymers Obtained under Aerobic Composting Conditions / I. Rossetti, F. Conte, G. Ramis // Eng. — 2021. — Т. 2, № 1. — С. 54–68. — DOI: 10.3390/eng2010005.

61NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Sergeev Oleg Evgen'evich
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University Polytechnic, Saint Petersburg, Russia
E-mail: ole13g@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1072490

Velmozhina Ksenia Alekseevna
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University Polytechnic, Saint Petersburg, Russia
E-mail: anizhomlev@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9623-057X
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1232788
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58419740600

Politaeva Natalia Anatol'evna
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University Polytechnic, Saint Petersburg, Russia
E-mail: politaevana1971@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5914-6210
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=439213
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57210316571

Badenko Vladimir L'vovich
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University Polytechnic, Saint Petersburg, Russia
E-mail: badenko_vl@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3054-1786
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=131728
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6508255564

Rumyantseva Nina Vyacheslavovna
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University Polytechnic, Saint Petersburg, Russia
E-mail: Rumyantseva_nv@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5045-6282
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=536365
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57210920516

Comprehensive assessment of polymer biodegradation under various environmental conditions and development of a mathematical model of the process

Abstract. Against the backdrop of the environmental crisis caused by large-scale pollution of the environment with plastic waste, the urgency of the problem of their disposal and biodegradation is of paramount importance. Given that synthetic polymers can persist in nature for centuries, accumulating in soil and water bodies and posing a serious threat to ecosystems, a comprehensive study of the biodegradation of polymer packaging materials available in retail chains has been conducted. The research focused on samples of polymer packaging available in major retail chains of the Russian Federation. The process of biodegradation was examined under various environmental conditions: standard (indoor) conditions, conditions according to GOST R 57219-2016, and conditions according to GOST R 58830-2020. Morphological changes in the surface of the samples were assessed based on scanning electron microscopy results, while chemical changes were evaluated using Fourier transform infrared spectroscopy. An empirical model for assessing biodegradation results, X(t), was proposed. This model establishes a conditional indicator of the degree of sample biodegradation, taking into account environmental temperature, humidity, and soil microorganism concentration. The X(t) indicator is presented in conventional units and is relative. This indicator is used for comparative analysis of the biodegradation process of samples under specified environmental conditions. The study revealed that the conditions regulated by GOST R 58830-2020 are the most favorable for the

biodegradation process of packaging samples. The findings have practical significance for improving the waste management system. The research contributes to solving the problem of environmental pollution by plastic waste through the development of a methodology for assessing the biodegradation of polymer materials under various environmental conditions.

Keywords: polymer; plastic; bioplastic; biodegradation; soil; polymer packaging; infrared spectroscopy; microscopy; mathematical modeling

61NZVN425
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com