

Научная статья

УДК 678.744.72:54-148; 547.458.61

doi: 10.17223/24135542/40/7

Влияние глицерина и борной кислоты в составе криогелей поливинилового спирта и крахмала на их биоразложение в почве, численность микрофлоры и рост растений

Варвара Сергеевна Овсянникова¹, Мария Сергеевна Фуфаева²

*^{1, 2} Институт химии нефти Сибирского отделения
Российской академии наук, Томск, Россия*

¹ varja@inbox.ru

² maria81@ipc.tsc.ru

Аннотация. Проблема избыточного накопления использованных синтетических полимерных материалов может быть частично решена заменой их на биоразлагаемые материалы на основе восполняемого сырья. Одним из вариантов могут быть составы на основе синтетического и природного полимеров – поливинилового спирта (ПВС) и крахмала, с добавлением пластификатора и / или сшивающего агента. Важной особенностью ПВС и крахмала является способность их водных растворов после цикла замораживания–оттаивания формировать криогели – вязкоупругие тела, сохраняющие стабильность при положительных температурах.

В статье изложены результаты экспериментов по моделированию биоразложения в почве криогелей ПВС и картофельного крахмала, модифицированных борной кислотой (БК) и глицерином. Показано, что сшивка борной кислотой делает криогели ПВС и ПВС с крахмалом более устойчивыми к воздействию аборигенной почвенной микрофлоры: за месяц потеря массы полимера достигла 24 и 60% соответственно. Введение в состав 5, 10 и 20% пластификатора – глицерина – повысило биоразлагаемость криогелей ПВС и крахмала до 79, 81 и 86% соответственно. Об активности деструктивных процессов свидетельствовало изменение численности почвенной микрофлоры: снижение численности с последующим частичным восстановлением в присутствии криогелей с борной кислотой и активный рост при разложении составов с глицерином. Повышение концентрации глицерина приводило к росту численности почвенной микрофлоры в 5–50 раз относительно контроля. Реакция тестовой растительной культуры (белой горчицы), однако, свидетельствовала о фитотоксичности продуктов распада криогелей с глицерином: в почвах после их деструкции сухая надземная масса была ниже на 60–70% относительно контроля. Фитопродуктивность почв после деструкции криогелей с борной кислотой менялась на разных этапах: сначала повышалась на 30–90%, затем снижалась на 15–40% по сравнению с контролем. Возможно, это стало следствием постепенного высвобождения бора из полимерных образцов: бор в малых концентрациях является микроэлементом для растений, а в высоких – оказывает токсическое действие.

Ключевые слова: поливиниловый спирт, картофельный крахмал, борная кислота, глицерин, криогель, биоразложение, почвенная микрофлора, фитотоксичность

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР № 121031500048-1).

Для цитирования: Овсянникова В.С., Фуфаева М.С. Влияние глицерина и борной кислоты в составе криогелей поливинилового спирта и крахмала на их биоразложение в почве, численность микрофлоры и рост растений // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 40. С. 64–74. doi: 10.17223/24135542/40/7

Original article

doi: 10.17223/24135542/40/7

The effect of glycerol and boric acid in the composition of polyvinyl alcohol and starch cryogels on their biodegradation in soil, the number of microflora and plant growth

Varvara S. Ovsyannikova¹, Maria S. Fufaeva²

*^{1, 2} Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

¹ varja@inbox.ru

² maria81@ipc.tsc.ru

Abstract. The problem of excessive accumulation of used synthetic polymer materials can be partially solved by replacing them with biodegradable materials based on renewable raw materials. One option is compositions based on synthetic and natural polymers—polyvinyl alcohol (PVA) and starch—with the addition of a plasticizer and/or cross-linking agent. An important feature of PVA and starch is the ability of their aqueous solutions to form cryogels after a freeze-thaw cycle—viscoelastic bodies that remain stable at positive temperatures.

This article presents the results of experiments modeling the biodegradation of PVA and potato starch cryogels modified with boric acid and glycerol in soil. It is shown that cross-linking with boric acid makes PVA and PVA-starch cryogels more resistant to the effects of native soil microflora: polymer mass loss reached 24 % and 60 %, respectively, within a month. The addition of 5, 10, and 20 % of the plasticizer glycerol increased the biodegradability of PVA and starch cryogels to 79, 81, and 86 %, respectively. The activity of the degradation processes was evidenced by changes in the soil microflora population: a decrease followed by partial recovery in the presence of cryogels containing boric acid and active growth during the decomposition of the glycerol-containing formulations. Increasing the glycerol concentration led to an increase in soil microflora population by 5–50 times relative to the control. The reaction of the test plant (white mustard), however, indicated the phytotoxicity of the degradation products of the glycerol-containing cryogels: in the soils after their degradation, the dry above-ground matter was 60–70 % lower than the control. Soil phytoproductivity after degradation of cryogels containing boric acid changed at different stages: initially, it increased by 30–90%, then decreased by 15–40 % compared to the control. This may have been due to the gradual release of borate from the polymer samples: boron is a micro-nutrient for plants at low concentrations, but is toxic at high concentrations.

Keywords: polyvinyl alcohol, potato starch, boric acid, glycerol, cryogel, biodegradation, soil microflora, phytotoxicity

Acknowledgments: The work was done within the framework of the state assignment of the Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (NIOKTR No. 121031500048-1).

For citation: Ovsyannikova, V.S., Fufaeva, M.S. The effect of glycerol and boric acid in the composition of polyvinyl alcohol and starch cryogels on their biodegradation in soil, the number of microflora and plant growth. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 40, 64–74. doi: 10.17223/24135542/40/7

Введение

В современном мире широко используются синтетические полимеры, большинство из которых не разлагается в окружающей среде. За счет огромного масштаба производства, невысокой стоимости и доступности полимерные материалы часто скапливаются в рекреационных и жилых зонах, образуя мусорные свалки [1]. Предполагается, что годовое производство твердых отходов к 2050 г. в мире может достичь 3,8 млрд т [2].

Решение данной проблемы может быть комплексным: сортировка и переработка полимерных материалов на основе невосполняемого сырья, более жесткое законодательное регулирование использования одноразовых изделий, а также разработка альтернативных биоразлагаемых полимерных материалов, в том числе на основе восполняемого сырья. Одной из альтернатив может стать поливиниловый спирт (ПВС), на базе которого в течение ряда лет уже ведется разработка материалов на замену традиционным пластикам.

Поливиниловый спирт широко применяется в разных отраслях промышленности – косметологии, медицине, пищевом производстве, целлюлозно-бумажной промышленности и сельском хозяйстве, хорошо себя зарекомендовал за счет отличной биосовместимости, разрешен к использованию в пищевой промышленности и, по данным ряда авторов, в определенных условиях способен к биоразложению [3–8].

Растворы ПВС способны формировать пленки, пригодные для изготовления различных видов упаковки [9]. Для улучшения характеристик и расширения областей применения в их состав вводят сшивающие агенты, пластификаторы, наполнители, гидрофобизаторы и др., а также изучают способность таких материалов к биоразложению [4, 5, 10, 11].

Кроме того, водные растворы ПВС после цикла замораживания–оттаивания способны формировать криогели – вязкоупругие тела, стабильные при комнатных условиях. В Институте химии нефти в течение ряда лет разрабатываются новые составы криогелей для решения разных технических и экологических задач – закрепления откосов, защиты почв от эрозии, создания противофильтрационных экранов, исследуется биоразлагаемость криогелей ПВС и крахмала в воде и почве [12, 13].

Цель работы – исследование разложения в почве криогелей поливинилового спирта и крахмала с глицерином и борной кислотой, оценка влияния криогелей и продуктов их распада на почвенную микрофлору и растения.

Методы

Объекты исследования: поливиниловый спирт (ПВС) марки 1799 АО «Химреактив» с молекулярной массой $M \sim 100 \cdot 10^3$, с менее чем 1% остаточных ацетатных групп, картофельный крахмал (КК) ГОСТ Р 53876–2010, борная кислота (БК) ТУ 6-09-17263–89 и глицерин ГОСТ 6259–75.

Для получения криогелей сначала готовили водные растворы разных составов (таблица).

Составы исследованных криогелей

№ на рисунках	Содержание компонента, мас. %			
	Поливиниловый спирт	Крахмал	Глицерин	Борная кислота
1	5,0	0	0	0,5
2	2,5	2,5	0	0,5
3	2,5	2,5	5	0
4	2,5	2,5	10	0
5	2,5	2,5	20	0

Криогели получали из растворов после цикла замораживания–оттаивания: составы замораживали при -20°C , оттаивали при $+20^\circ\text{C}$ в чашках Петри.

Исследовали способность криогелей к биологическому разложению в условиях почвенного теста [14]. Образцы помещали в закрытые контейнеры с почвой и термостатировали при 30°C . В определенные сроки очередной образец извлекали, отмывали от почвы, высушивали и взвешивали, определяя остаточный вес полимера. После извлечения образца почву в контейнерах перемешивали и отбирали навески для определения численности микрофлоры и влажности почвы. На каждый вариант состава криогеля закладывали серию контейнеров с почвой и предварительно взвешенными образцами по числу точек определения показателей.

Численность микрофлоры определяли посевом на агаризованные среды: аммонифицирующей микрофлоры на мясопептонный агар и амилалитической – на крахмало-аммиачный агар [15]. Диаграммы построены на средних арифметических значениях в каждой точке, рассчитанных из 4–6 повторностей, с относительной погрешностью 15%. Влажность почвы определяли весовым методом, затем пересчитывали содержание микроорганизмов на 1 г сухой почвы.

Образцы почвы, контактировавшие с криогелями на протяжении разных сроков, были исследованы на фитотоксичность [16]. Тест-объектом послужила горчица белая (*Sinapis alba* L.), семена которой (50 шт.) засевали в контейнеры с почвой после деструкции криогелей. Через 7 суток надземную массу проростков срезали, высушивали и взвешивали. Влияние состава криогелей и продуктов их биоразложения на рост горчицы оценивали по отношению сухой надземной массы растений в опытном варианте к данным, полученным для контрольной почвы, выраженному в процентах:

$$\text{Фитотоксичность} = \frac{m_{\text{оп}}}{m_{\text{кон}}} \cdot 100\%.$$

Результаты

Ранее были исследованы процессы разложения в почве криогелей на основе ПВС и крахмала в разных соотношениях [12, 13]. Было показано, что потери сухой массы криогелей составили 43–88% в зависимости от доли крахмала в их составе, а продукты разложения снизили всхожесть семян белой горчицы на 2–12% относительно контроля.

Присутствие в составе 0,5% БК снизило биоразлагаемость составов в почве: минимальные потери массы – 22–24% – были отмечены для образца 1 на основе 5% ПВС (рис. 1, а). Это снижение массы, вероятнее всего, было связано с вымыванием непрореагировавших мономеров и БК, но не с деструкцией полимерных цепей, так как с 7-е по 29-е сутки снижения массы полимера более не происходило. Криогель ПВС и крахмала с борной кислотой (образец 2) за 27 суток в почве терял до 60% сухой массы: через неделю потеря массы составила 40% от исходной, через 14 суток достигла 60% и далее не менялась.

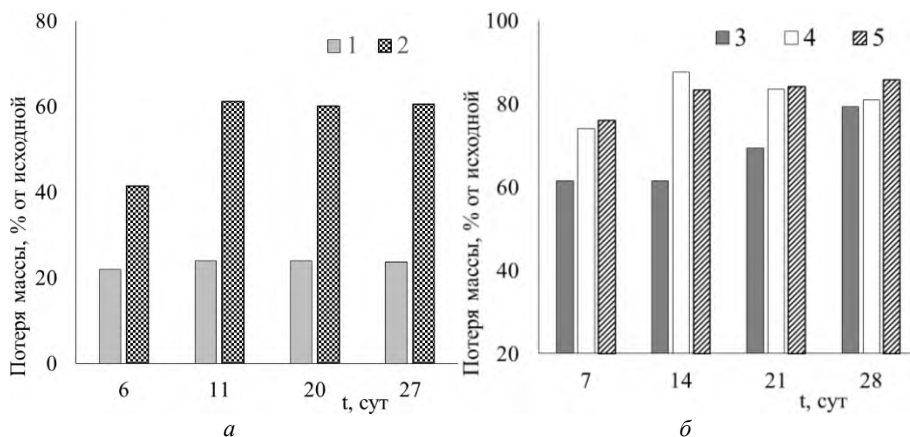


Рис. 1. Потеря массы сухого вещества криогелей ПВС и крахмала при их деструкции в почве: а – составы с БК, б – составы с глицерином

Введение 5, 10 и 20% глицерина в состав криогеля на основе ПВС и крахмала повысило биоразлагаемость образцов до 79, 81 и 86% соответственно (рис. 1, б). Для сравнения: аналогичный состав без глицерина подвергался разложению в почве на 69% [17]. Деструкция состава с 5% глицерина (образец 3) продолжалась до 28 суток, для составов с 10 и 20% глицерина (образцы 4 и 5) снижение массы продолжалось до 14 суток, затем процесс вышел на плато (см. рис. 1, б). Глицерин как доступный микроорганизмам компонент повышает биоразлагаемость материалов в целом [18].

Исследование роста почвенной микрофлоры при деструкции криогелей показало, что составы с БК негативно влияли на аммонифицирующую и амилалитическую микрофлору, подавив ее численность к 11-м суткам в 2 и 10 раз относительно начала опыта (рис. 2) и удерживая ниже контроля на

протяжении всего опыта. Уровня контроля численность достигла к 20-м суткам, а выше контроля лишь к 27-м суткам в присутствии состава ПВС с крахмалом (см. рис. 2, а).

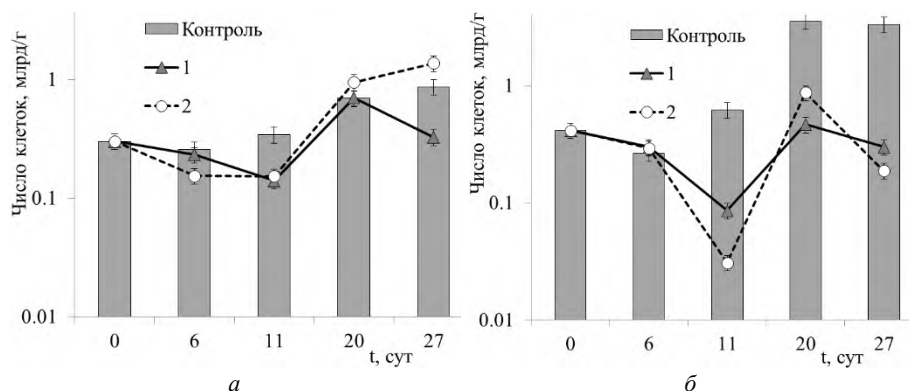


Рис. 2. Динамика аммонифицирующей (а) и амилаолитической (б) почвенной микрофлоры при деструкции криогелей ПВС (образец 1) и ПВС + крахмал (образец 2) с 0,5% БК

Присутствие глицерина в составе криогелей ПВС и крахмала делало их более привлекательными для почвенной микрофлоры. Численность аммонифицирующей микрофлоры менялась согласно классической S-образной кривой, начавшейся с фазы экспоненциального роста, с максимумом на 14-е сутки и последующим отмиранием (рис. 3, а).

Амилотическая микрофлора положительно реагировала на присутствие криогелей ПВС и крахмала: на протяжении всего опыта ее численность была значимо выше контроля, а относительно начала опыта возросла в 20–30 раз и продолжала расти даже к концу опыта (рис. 3, б). Для аммонифицирующей микрофлоры прослеживалась прямая связь ее численности с долей глицерина в разлагаемом образце (см. рис. 3, а), для амилаолитической микрофлоры эта связь несколько нарушалась: при деструкции образца с 5% глицерина численность была выше, чем с 10 % (см. рис. 3, б).

Одним из аспектов разложения полимерных материалов в условиях окружающей среды является влияние продуктов их распада на живые организмы, в частности на растения. Почвы после деструкции в них образцов криогелей ПВС и крахмала с борной кислотой и глицерином были протестированы на токсичность по отношению к белой горчице – культуре, используемой в качестве сидерата.

В почвах после двух недель деструкции криогелей с БК сухая надземная масса растений горчицы возрастала относительно контроля на 40–80%, а после 3–4 недель деструкции фитомасса снижалась на 10–40% (рис. 4, а). БК в криогелях ПВС и крахмала является сшивающим агентом, образуя ковалентные связи с полимерными молекулами, поэтому в начале опыта, вероятнее всего, излишний бор не поступал в почву и не оказывал токсического действия на растения. Снижение фитомассы горчицы в почве, контактировавшей

в течение 20 и 27 суток с содержащими БК криогелями, может быть обусловлено как раз ее высвобождением вследствие разрушения полимерной сетки, так как фитотоксичность почвы, численность микрофлоры и степень деструкции образцов криогелей менялись параллельно.

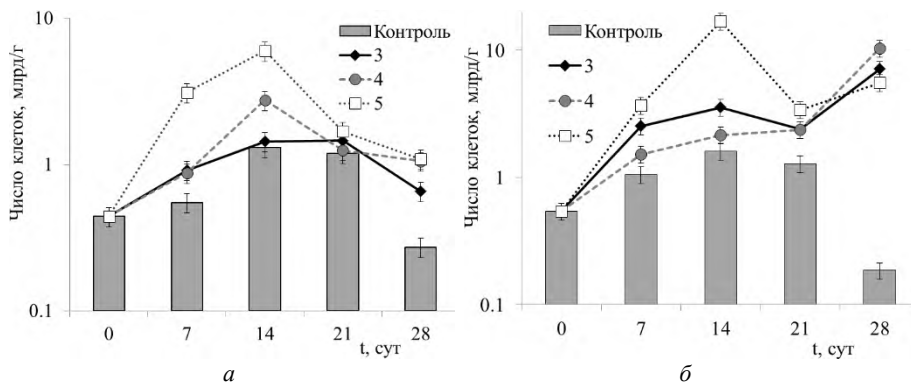


Рис. 3. Динамика численности аммонифицирующей (а) и амилалитической (б) почвенной микрофлоры в присутствии криогелей с разным содержанием глицерина: 5% (образец 3), 10% (образец 4), 20% (образец 5)

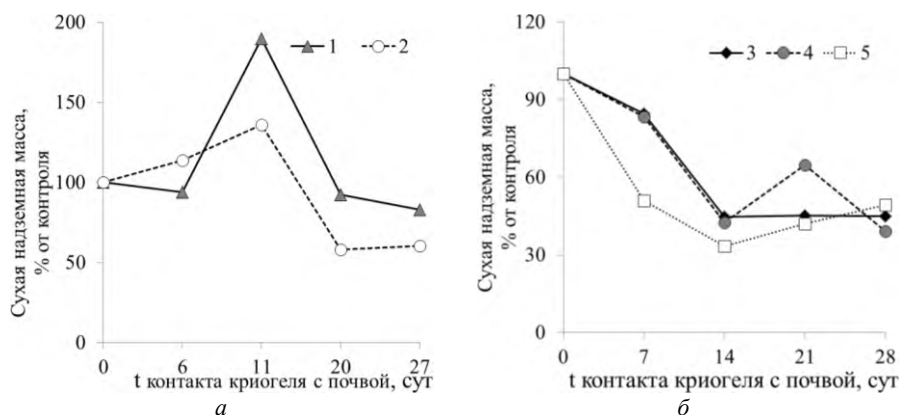


Рис. 4. Влияние криогелей ПВС и крахмала с добавлением БК (а) и глицерина (б) и продуктов их деструкции после разных сроков на продуктивность белой горчицы

В почвах после деструкции криогелей с глицерином при любых сроках экспозиции получены сниженные на 17–67% значения фитомассы относительно нативной почвы (рис. 4, б). Минимальная фитопродуктивность получена в почвах через 14 суток деструкции криогелей с глицерином, максимальную токсичность проявила почва после состава с 20% ГЦ: фитомасса составила всего 33% от контроля. К 21–28-м суткам токсичность почвы незначительно снижалась (фитомасса достигла 39–65% от контроля).

Хотя глицерин хорошо утилизируется разными видами микроорганизмов, возможно, токсическое воздействие на растения оказал либо его избыток, либо продукты распада.

Выводы

Криогель ПВС, сшитый 0,5% борной кислотой, практически не разлагался в почве, а биоразложение сшитого криогеля ПВС и крахмала замедлилось в первые 10 суток, что подтверждалось снижением численности почвенной амилолитической и аммонифицирующей микрофлоры, но сопровождалось ростом фитопродуктивности. Через полмесяца, после некоторой адаптации микрофлоры, начались разрушение полимеров в составе данного образца, высвобождение борной кислоты и повышение фитотоксичности почвы.

Пластификатор глицерин, внесенный в количестве 5, 10 и 20%, повысил биоразлагаемость криогелей ПВС и крахмала в почве до 80–85% за 28 суток за счет активного роста почвенной микрофлоры обеих исследуемых групп, оказывая угнетающее действие на тест-культуру растений.

Возможно, сочетание в одном составе этих добавок обеспечит более благоприятные условия для растений после биодеструкции в почве.

Список источников

1. Бердыева А. Экологические последствия использования пластика и пути борьбы с пластиковым загрязнением окружающей среды // *Инновационная наука*. 2019. № 5-1. С. 214–216.
2. Краскевич Д.А., Щербаков Д.В., Жернов Ю.В. и др. Система мер по уменьшению пластикового загрязнения и потенциального воздействия на здоровье человека (обзор литературы) // *Медицина труда и экология человека*. 2024. № 3. С. 113–131.
3. Хасанова Г.Б. Биоразлагаемые полимеры – путь к устойчивому развитию природы и общества // *Вестник КНИТУ*. 2014. Т. 17, № 18. С. 323–325.
4. Студеникина Л.Н., Домарева С.Ю., Голенских Ю.Е. и др. Повышение прочности и водостойкости на основе поливинилового спирта с помощью борной кислоты // *Вестник ВГУИТ*. 2022. Т. 84, № 2 (92). С. 249–255.
5. Pokhrel S., Sundari L.R. Fabrication and Characterization of Starch-Based Biodegradable Polymer with Polyvinyl Alcohol // *Nepal Chemical Society*. 2019. Vol. 40. P. 57–66.
6. Patel M., Islam S., Kallem P. et. al. Potato starch-based bioplastics synthesized using glycerol–sorbitol blend as a plasticizer: characterization and performance analysis // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023. № 20. P. 7843–7860.
7. Zanela J., Casagrande M., Reis M. et. al. Biodegradable Sheets of Starch/Polyvinyl Alcohol (PVA): Effects of PVA Molecular Weight and Hydrolysis Degree // *Waste Biomass Valor.* 2019. № 10. P. 319–326.
8. Павленок А.В., Давыдова О.В., Дробышевская Н.Е. и др. Получение и свойства биоразлагаемых композиционных материалов на основе поливинилового спирта и крахмала // *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. 2018. № 1. С. 38–45.
9. Черная А.И., Шульга О.С., Арсеньева Л.Ю. и др. Упаковочные биodeградебельные пленки на основе поливинилового спирта // *Упаковка и материалы*. 2019. № 6. С. 32–35.
10. Суворова А.И., Тюкова И.С., Смирнова Е.А. и др. Реологические свойства смесей тройного сополиамида 6/66/610 с хитозаном // *Журнал прикладной химии*. 2005. Т. 78, № 6. С. 989–992.
11. Папкина В.Ю., Малинкина О.Н., Шиповская А.Б. и др. Свойства, деградация в почвогрунте и фитотоксичность композитов крахмала с поливиниловым спиртом // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Химия. Биология. Экология*. 2018. Т. 18, № 1. С. 25–35.

12. Овсянникова В.С., Фуфаева М.С., Ким Е. и др. Биоразложение в почве материалов на основе криогелей поливинилового спирта и крахмала // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2023. Т. 66, вып. 11. С. 126–134.
13. Фуфаева М.С., Овсянникова В.С., Манжай В.Н. и др. Получение и свойства биоразлагаемых криогелей на основе поливинилового спирта и картофельного крахмала для борьбы с эрозией почв // Химия в интересах устойчивого развития. 2023. Т. 31, № 5. С. 601–607.
14. ГОСТ Р 54530–2011. Ресурсосбережение. Упаковка. Требования, критерии и схема утилизации упаковки посредством компостирования и биологического разложения : (введ. впервые с 01.01.2013). М. : Стандартинформ, 2014. 18 с.
15. Терещенко Н.Н., Акимова Е.Е., Минаева О.М. Современные методы оценки микробиологических свойств и экологического статуса почвы : практикум. Томск : Изд. Дом ТГУ, 2017. 152 с.
16. Тишин А.С., Тишина Ю.Р. Методы и способы фитотестирования почв (обзор) // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 11 (113), ч. 2. С. 93–99.
17. Овсянникова В.С., Фуфаева М.С. Биоразложение криогелей на основе поливинилового спирта и крахмала с глицерином и борной кислотой // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2025. Т. 68. С. 126–134.
18. Du Toit J.P., Pott R.W.M. Transparent polyvinyl-alcohol cryogel as immobilisation matrix for continuous biohydrogen production by phototrophic bacteria // Biotechnol Biofuels. 2020. Vol. 13 (1). Art. 105. doi: 10.1186/s13068-020-01743-7

References

1. Berdiyeva, A. Ekologicheskie posledstviya ispol'zovaniya plastika i puti bor'by s plastikovym zagryazneniem okruzhayushchey sredy [Environmental impacts of plastic use and ways to combat plastic pollution]. *Innovatsionnaya nauka*, 2019, No. 5–1, pp. 214–216. (in Russian)
2. Kraskevich, D.A., Shcherbakov, D.V., Zhernov, Yu.V. et al. Sistema mer po umensheniyu plastikovogo zagryazneniya i potentsial'nogo vozdeystviya na zdorov'e cheloveka (obzor literatury) [A system of measures to reduce plastic pollution and potential impacts on human health (literature review)]. *Meditisina truda i ekologiya cheloveka*, 2024, No. 3, pp. 113–131. (in Russian)
3. Khasanova, G.B. Biorazлагаемые полимеры – путь к устойчивому развитию природы и общества [Biodegradable polymers – the path to sustainable development of nature and society]. *Vestnik KNITU*, 2014, Vol. 17, No. 18, pp. 323–325. (in Russian)
4. Studenikina, L.N., Domareva, S.Yu., Golenkikh, Yu.E. et al. Povyshenie prochnosti i vodostoykosti na osnove polivinil'nogo spirta s pomoshch'yu bornoy kisloty [Strengthening and water resistance of polyvinyl alcohol-based polymers using boric acid]. *Vestnik VGUIT*, 2022, Vol. 84, No. 2 (92), pp. 249–255. (in Russian)
5. Pokhrel S.; Sundari L.R. Fabrication and Characterization of Starch-Based Biodegradable Polymer with Polyvinyl Alcohol. *Nepal Chemical Society*. 2019, 40, 57–66.
6. Pate, M.; Islam S.; Kallem P., et. al. Potato starch-based bioplastics synthesized using glycerol–sorbitol blend as a plasticizer: characterization and performance analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023, 20, 7843–7860.
7. Zanela J.; Casagrande M.; Reis M. et. al. Biodegradable Sheets of Starch/Polyvinyl Alcohol (PVA): Effects of PVA Molecular Weight and Hydrolysis Degree. *Waste Biomass Valor.* 2019, 10, 319–326.
8. Pavlenok, A.V., Davydova, O.V., Drobyshevskaya, N.E. et al. Proizvodstvo i svoystva biorazлагаемых композиционных материалов на основе поливинил'ного спирта и крахмала [Production and properties of biodegradable composite materials based on polyvinyl alcohol and starch]. *Vestnik GGTU im. P.O. Sukogo*, 2018, No. 1, pp. 38–45. (in Russian)

9. Chernaya, A.I., Shul'ga, O.S., Arsen'eva, L.Yu. et al. Upakovochnye biorazлагаемые пленки на основе поливинил'ного спирта [Biodegradable packaging films based on polyvinyl alcohol]. *Upakovka i materialy*, 2019, No. 6, pp. 32–35. (in Russian).
10. Suvorova, A.I., Tyukova, I.S., Smirnova, E.A. et al. Reologicheskie svoystva smesey troynogo sopolyamida 6/66/610 s khitozonom [Rheological properties of blends of ternary copolyamide 6/66/610 with chitosan]. *ZhPKh*, 2005, Vol. 78, No. 6, pp. 989–992. (in Russian)
11. Papkina, V.Yu., Malinkina, O.N., Shipovskaya, A.B. et al. Svoystva, degradatsiya v pochvogrunte i fitotoksichnost' kompozitov krakhmala s polivinil'nyim spirtom [Properties, soil degradation, and phytotoxicity of starch-polyvinyl alcohol composites]. *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Khimiya. Biologiya. Ekologiya*, 2018, Vol. 18, No. 1, pp. 25–35. (in Russian)
12. Ovsyannikova, V.S., Fufaeva, M.S., Kim, E. et al. Biorazložhenie v pochve materialov na osnove kriogeley polivinil'ного спирта i krakhmala [Biodegradation of materials based on polyvinyl alcohol and starch cryogels in soil]. *Izv. vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya*, 2023, Vol. 66, Iss. 11, pp. 126–134. (in Russian)
13. Fufaeva, M.S., Ovsyannikova, V.S., Manzhay, V.N. et al. Poluchenie i svoystva biorazлагаемых криогелей на основе поливинил'ного спирта i kartofelnogo krakhmala dlya bor'by s eroziyey pochv [Production and properties of biodegradable cryogels based on polyvinyl alcohol and potato starch for soil erosion control]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2023, Vol. 31, No. 5, pp. 601–607. (in Russian)
14. GOST R 54530-2011. *Resursoberezeniye. Upakovka. Trebovaniya, kriterii i skhema utilizatsii upakovki posredstvom kompostirovaniya i biologicheskogo razloženiya* [Resource Conservation. Packaging. Requirements, Criteria, and Scheme for Packaging Disposal through Composting and Biodegradation]. Moscow: Standartinform, 2014, 18 p. (in Russian)
15. Tereshchenko, N.N., Akimova, E.E., Minaeva, O.M. *Sovremennyye metody otsenki mikrobiologicheskikh svoystv i ekologicheskogo statusa pochvy: praktikum* [Modern methods for assessing the microbiological properties and ecological status of soil: a practical course]. Izdatel'skiy dom TGU: Tomsk, 2017, 152 p. (in Russian)
16. Tishin, A.S., Tishina, Yu.R. *Metody i sposoby fitotestirovaniya pochv (obzor)* [Methods and techniques for soil phytotesting (review)]. *Mezhd. nauch.-issled. zhurn.*, 2021, No. 11 (113), Part 2, pp. 93–99. (in Russian)
17. Ovsyannikova, V.S., Fufaeva, M.S. Biorazložheniye kriogeley na osnove polivinil'ного спирта i krakhmala s glitserinom i bornoy kislotoy [Biodegradation of cryogels based on polyvinyl alcohol and starch with glycerol and boric acid]. *Izvestiya VUZov. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2025, Vol. 68, pp. 126–134. (in Russian)
18. Du Toit J.P., Pott R.W.M. Transparent polyvinyl-alcohol cryogel as immobilisation matrix for continuous biohydrogen production by phototrophic bacteria. *Biotechnol Biofuels*. 2020 Jun 9;13:105. DOI: 10.1186/s13068-020-01743-7.

Сведения об авторах:

Овсянникова Варвара Сергеевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории коллоидной химии нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: varja@inbox.ru

Фуфаева Мария Сергеевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории коллоидной химии нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: maria81@ipc.tsc.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Ovsyannikova Varvara S. – Candidate of Chemical Sciences, Senior Research Fellow, Laboratory of Colloidal Chemistry of Petroleum, Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: varja@inbox.ru

Fufaeva Maria S. – Candidate of Chemical Sciences, Senior Research Fellow, Laboratory of Colloidal Chemistry of Petroleum, Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: maria81@ipc.tsc.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.11.2025; принята к публикации 03.12.2025

The article was submitted 03.11.2025; accepted for publication 03.12.2025