

Пролонгированная биологическая активность *Trichoderma* spp. при твердофазной со-иммобилизации в гранулированной матрице

© Ребрина⁺ Анастасия Сергеевна, Бехбудзаде Нурлан Бешир-оглы,
Шагаев Антон Александрович, Белов Алексей Алексеевич,
Марквичев* Николай Семёнович

Кафедра биотехнологии. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Миусская площадь, 9. г. Москва, 125047. Россия. Тел.: +7 (962) 576-78-17. E-mail: rebrina.a.s@muctr.ru

*Ведущий направление; ⁺Поддерживающий переписку

Ключевые слова: иммобилизация, гранулирование, *Trichoderma*, пролонгированное высвобождение, УФ-защита.

Аннотация

Разработан метод твердофазной со-иммобилизации грибов *Trichoderma longibrachiatum* F-2124, *T. harzianum* F-2009, *T. viride* F-2001 в гранулированную матрицу на основе каолина, гипса и глюкозы. Ключевая особенность метода – совместное внесение микроорганизма с субстратом (глюкозой), что в модельных опытах на стерильном торфе способствует ускоренной колонизации субстрата. Оптимальный расход связующего вещества (536 мл/кг), представленного 30%-ой глюкозой, обеспечивает выход фракции 2.0-2.8 мм до 45%. Введение 15% гипса повышает прочность гранул с 0 до 3.3 Н, добавление глюкозы – до 13.1 Н. Иммобилизованные споры сохраняют жизнеспособность после сушки (80±5 °С, 90 мин.) с титром 10⁵ КОЕ/г и при хранении в течение 4-х месяцев при 22 °С (титр ≥10⁵ КОЕ/г). Иммобилизация обеспечивает 100- и 1000-кратную защиту от УФ-излучения по сравнению со свободными спорами. Выход из гранулы на «голодном агаре» начинается через 48-72 ч, радиальная скорость роста иммобилизованных культур в экспоненциальной фазе (0.22-0.42 мм/ч) выше скорости роста свободных спор (0.16-0.31 мм/ч). На стерильном торфе иммобилизованные споры *Trichoderma* spp. колонизируют субстрат с титром 3-8·10⁵ КОЕ/г за 4 суток. Иммобилизованный *T. longibrachiatum* F2124 подавляет *Fusarium oxysporum* F2106 на 70.4% на среде Чапека. Разработанные гранулы не оказывают фитотоксичного влияния на ростовые характеристики озимой пшеницы (всхожесть 85-95%, фитотоксический эффект от -7% до +4%). Метод применим только для споровой формы *Trichoderma* spp. (мицелий не выживает при сушке).

Выходные данные для цитирования русскоязычной печатной версии статьи:

Ребрина А.С., Бехбудзаде Н.Б., Шагаев А.А., Белов А.А., Марквичев Н.С. Пролонгированная биологическая активность *Trichoderma* spp. при твердофазной со-иммобилизации в гранулированной матрице. *Бутлеровские сообщения*. 2026. Т.87. №7. С.111-119. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-7-111

Выходные данные для цитирования русскоязычной электронной версии статьи:

Ребрина А.С., Бехбудзаде Н.Б., Шагаев А.А., Белов А.А., Марквичев Н.С. Пролонгированная биологическая активность *Trichoderma* spp. при твердофазной со-иммобилизации в гранулированной матрице. *Бутлеровские сообщения* С. 2026. Т.14. №3. Id.5. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-7-111/ROI-jbc-C/26-14-3-5 (Russian)

The output for citing the English online version of the article:

Anastasia S. Rebrina, Nurlan B. Bekhbudzade, Anton A. Shagaev, Alexey A. Belov, Nikolay S. Markvichev. Prolonged biological activity of *Trichoderma* spp. during solid-phase co-immobilization in a granular matrix. *Butlerov Communications* C. 2026. Vol.14. No.3. Id.5. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-7-111/ROI-jbc-C/26-14-3-5

Литература

- [1] M. Hartmann, J. Six. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023. Vol.4. No.1. P.4-18. DOI: 10.1038/s43017-022-00366-w
- [2] M. Zhao, J. Zhao, J. Yuan, L. Hale, T. Wen, Q. Huang, J.M. Vivanco, J. Zhou, G.A. Kowalchuk, Q. Shen. Root exudates drive soil-microbe-nutrient feedbacks in response to plant growth. *Plant, Cell & Environment*. 2021. Vol.44. No.2. P.613-628. DOI: 10.1111/pce.13928

- [3] X. Fan, A.H. Ge, S. Qi, Y. Guan, R. Wang, N. Yu, E. Wang. Root exudates and microbial metabolites: signals and nutrients in plant-microbe interactions. *Science China Life Sciences*. **2025**. Vol.68. No.8. P.2290-2302. DOI: 10.1007/s11427-024-2876-0
- [4] T.T. Win, B. Bo, S. Khan, P. Fu. Ecological dominance, functional roles, and biosafety of *Trichoderma* spp. as a biofertilizer fungus. *Frontiers in Fungal Biology*. **2025**. Vol.6. P.1641004. DOI: 10.3389/ffunb.2025.1641004
- [5] K. Gutiérrez-Moreno, A.I. Olgún-Martínez, A.C. Montoya-Martínez, S. de los Santos-Villalobos. *Trichoderma* in Sustainable Agriculture and the Challenges Related to Its Effectiveness. *Diversity*. **2025**. Vol.17. No.10. P.734. DOI: 10.3390/d17100734
- [6] A. Hahlbohm, C. Struck, F. de Mol, B. Strehlow UV-C treatment has a higher efficacy on reducing germination of spores rather than mycelium growth. *European Journal of Plant Pathology*. **2025**. Vol.172. No.4. P.761-777. DOI: 10.1007/s10658-025-03037-w
- [7] S.S. Veena, C. Vinod, J. Sreekumar, S. Karthikeyan, M.L. Jeeva Assessment of variability in temperature tolerance and antagonistic activity among *Trichoderma* isolates for biological control applications. *Journal of Root Crops*. **2024**. Vol.50. No.1. P.23-31.
- [8] S. Munnysha, R.N. Bunker, S.R. Babu, K. Mondal, R. Abhi, S. Akodiya, N. Gahlot, D. Sharma Synthesis and optimization of agro-based solid and liquid formulation for enhanced shelf-life and biomass production of *Trichoderma asperellum*. *Plant Science Today*. **2025**. Vol.12. P.4641. DOI: 10.14719/pst.4641
- [9] Горюнова О.Б. Разработка биологического препарата для борьбы с личинками комаров. *Дисс. ... канд. техн. наук. Москва*. **2009**. 154с. [O.B. Goryunova. Development of a biological preparation for the control of mosquito larvae. *PhD Thesis. Moscow*. **2009**. 154p. (Russian)]
- [10] Аушева Х.А. Разработка новой формы биопрепарата для очистки водных объектов от тонких нефтяных пленок. *Дисс. ... канд. техн. наук. Москва*. **2007**. 181с. [Kh.A. Ausheva. Development of a new form of biopreparation for purification of water bodies from thin oil films: Diss. ... Cand. Tech. Sci. Moscow, **2007**. 181p. (Russian)]
- [11] Чекалова К.В. Разработка новой препаративной формы биологических фунгицидов на основе клеток микроорганизмов *Trichoderma viride* и *Pseudomonas fluorescens*. *Дисс. ... канд. биол. наук. Москва*. **2007**. 162с. [K.V. Chekalova Development of a new formulation of biological fungicides based on cells of microorganisms *Trichoderma viride* and *Pseudomonas fluorescens*. *PhD Thesis. Moscow*. **2007**. 162p. (Russian)]
- [12] M.G. Brondi, C. Florencio, V.M. Vasconcellos, C. Ribeiro, C.S. Farinas Enhancing the shelf life and stress tolerance of the biocontrol agent *Trichoderma harzianum* by encapsulation in green matrices of nanocellulose and carboxymethyl cellulose. *ACS Agricultural Science & Technology*. **2025**. Vol.5. No.6. P.1178-1188. DOI: 10.1021/acsagscitech.5c00189
- [13] M.C. da Silva, L.R. da Silva, H.G.F. Alves, É.V.O. de Jesus, P.C.V. da Silva, T.M.C. dos Santos Imobilização de *Trichoderma*spp. em alginato e viabilidade sob diferentes condições de armazenamento. *Diversitas Journal*. **2024**. Vol.9. No.1. P.183–191.
- [14] M. Liu, J. Zheng, L. Yu, S. Shao, W. Zhou, J. Liu Engineering *Nannochloropsis oceanica* for concurrent production of canthaxanthin and eicosapentaenoic acid. *Bioresource Technology*. **2024**. Vol.413. P.131525. DOI: 10.1016/j.biortech.2024.131525
- [15] R.M. Atlas Handbook of microbiological media (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC press. **2004**. 2051p. DOI: 10.1201/9781420039726
- [16] Писаревская В.А., Журавлева А.С., Минич М.В., Бехбудзаде Н.Б.О., Шагаев А.А., Марквичев Н.С. Рост и взаимодействие штаммов *Trichoderma* spp. при различных температурах. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. **2022**. Т.12. №.3(42). С.417-423. DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-3-417-423 [V.A. Pisarevskaya, A.S. Zhuravleva, M.V. Minich, N.B.O. Bekhbudzade, A.A. Shagaev, N.S. Markvichev Growth and interaction of *Trichoderma* spp. strains at different temperatures. *University Proceedings. Applied Chemistry and Biotechnology*. **2022**. Vol.12. No.3(42). P.417-423. DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-3-417-423 (Russian)]
- [17] Anastasia S. Rebrina, Nurlan B. Bekhbudzade, Anton A. Shagaev, Alexey A. Belov, Nikolay S. Markvichev. Prolonged biological activity of *Trichoderma* spp. during solid-phase co-immobilization in a granular matrix. *Butlerov Communications C*. **2026**. Vol.14. No.3. Id.5. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-7-111/ROI-jbc-C/26-14-3-5
- [18] Ребрина А.С., Бехбудзаде Н.Б., Шагаев А.А., Белов А.А., Марквичев Н.С. Пролонгированная биологическая активность *Trichoderma* spp. при твердофазной со-иммобилизации в гранулированной матрице. *Бутлеровские сообщения C*. **2026**. Т.14. №3. Id.5. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-7-111/ROI-jbc-C/26-14-3-5 (Russian)

The English version of the article has been published in the international edition of the journal

Butlerov Communications C
Advances in Biochemistry & Technologies

The Reference Object Identifier – ROI: jbc-C/26-14-3-5

The Digital Object Identifier – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-7-111/ROI-jbc-C/26-14-3-5

Prolonged biological activity of *Trichoderma* spp. during solid-phase co-immobilization in a granular matrix

**Anastasia S. Rebrina,⁺ Nurlan B. Bekhbudzade, Anton A. Shagaev,
Alexey A. Belov, Nikolay S. Markvichev***

Mendeleev University of Chemical Technology, Miusskaya Square, 9, Moscow, 125047. Russia.

Phone: +7 (962) 576-78-17. E-mail: rebrina.a.s@muctr.ru

*Supervising author; ⁺Corresponding author

Keywords: immobilization, granulation, *Trichoderma*, prolonged release, UV protection.

Abstract

A method has been developed for the solid-phase co-immobilization of the fungi *Trichoderma longibrachiatum* F-2124, *T. harzianum* F-2009, and *T. viride* F-2001 into a granular matrix based on kaolin, gypsum, and glucose. The key feature of the method is the simultaneous introduction of the microorganism and the substrate (glucose), which, in model experiments on sterile peat, promotes accelerated substrate colonization. The optimal consumption of the binding agent (536 mL/kg), represented by 30% glucose, yields up to 45% of the 2.0-2.8 mm fraction. The addition of 15% gypsum increases granule strength from 0 to 3.3 N, while the addition of glucose raises it to 13.1 N. Immobilized spores remain viable after drying (80±5 °C, 90 min) with a titer of 10⁵ CFU/g and during storage for 4 months at 22 °C (titer ≥10⁵ CFU/g). Immobilization increases resistance to UV radiation by 100- to 1000-fold compared to free spores. Release from the granule on starvation agar begins after 48-72 hours; the radial growth rate of immobilized cultures in the exponential phase (0.22-0.42 mm/h) is higher than that of free spores (0.16-0.31 mm/h). On sterile peat, immobilized *Trichoderma* spp. spores colonize the substrate with a titer of 3-8·10⁵ CFU/g within 4 days. Immobilized *T. longibrachiatum* F2124 suppresses *Fusarium oxysporum* F2106 by 70.4% on Czapek medium. The developed granules do not exert phytotoxic effects on winter wheat growth parameters (germination rate 85-95%, phytotoxic effect from -7% to +4%). The method is applicable only to the spore form of *Trichoderma* spp. (mycelium does not survive drying).