

Электронный дополнительный материал

УДК 579.66

ПОЛИСАХАРИДЫ ВЫСШИХ ГРИБОВ: СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ДАННЫХ О ВЫДЕЛЕНИИ, СТРУКТУРЕ, БИОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ И ПРЕБИОТИЧЕСКОМ ПОТЕНЦИАЛЕ*

© *Д.В. Минаков^{1,2**}, Е.С. Саврасов¹, О.Н. Мусина²*

¹ Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, Барнаул, 656049,
Россия, MinakovD-1990@yandex.ru

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
пр. Ленина, 46, Барнаул, 656038, Россия

* Полный текст статьи опубликован: Минаков Д.В., Саврасов Е.С., Мусина О.Н. Полисахариды высших грибов: систематизация данных о выделении, структуре, биологических свойствах и пребиотическом потенциале // Химия растительного сырья. 2025. №3. С. 60–87. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.20250317374>.

** Автор, с которым следует вести переписку.

Примеры недавних исследований, посвященных пребиотическому потенциалу грибных полисахаридов

Виды грибов	Полисахаридная фракция	Тип исследования	Основные результаты	Ссылки
1	2	3	4	5
<i>Agaricus bisporus</i>	Полисахарид (молекулярная масса: 3.62×10^6 Да; состоит из Glc 62%, Gal 20%, Man 8%, Xyl 3%, Fuc 3% и Ara 2%)	Моделирование работы ЖКТ <i>in vitro</i> и ферментация фекалий человека <i>in vitro</i>	↑ Короткоцепочечные жирные кислоты (КЦЖК) (например, уксусная кислота); ↑ <i>Prevotella</i> , <i>Phascolarctobacterium</i> и <i>Parabacteroides</i> ; ↓ <i>Fusobacterium</i> , <i>Escherichia</i> , <i>Sutterella</i> и <i>Desulfovibrio</i>	[1]
<i>Coprinus comatus</i>	Хитин-глюкановый комплекс (β -хитин; Glc и GlcN; степень N-ацетилирования: 62%; индекс кристалличности 25%)	Ферментация человеческих фекалий <i>in vitro</i>	↑ <i>Bacteroides</i> и <i>Bifidobacterium</i> ; ↑ КЦЖК (например, пропионовая и масляная кислоты)	[2]
<i>Dictyophora indusiata</i>	Водорастворимые (BP) и нерастворимые в воде (HPB) полисахариды (BP: Xyl, Gal, Glc и Man; HPB: Glc)	Животные (молодые мыши) Введение через зонд. Анализ фекальной микробиоты	↑ Разнообразие кишечной микрофлоры; ↑ <i>Lactobacillus</i> ; ↑ КЦЖК (например, уксусная и масляная кислоты)	[3]
<i>Ganoderma lucidum</i> и <i>Poria cocos</i>	Коммерческий препарат, полисахариды (полисахариды как мицелия, так и плодовых тел; чистота 30% от Zhi-Quing-Tang Biotech Company Ltd., Китай)	Животные (крысы в возрасте 6 недель). Введение через зонд. Анализ фекальной микробиоты.	↑ Полезные бактерии (например, <i>Bifidobacterium choerinum</i> и <i>Eubacterium rectale</i>); ↓ Патогенные бактерии; ↑ КЦЖК и молочная кислота	[4]
<i>Lentinula edodes</i>	Коммерческий лентинан (не указан производитель) в сочетании с полисахаридами <i>Lycium barbarum</i> и <i>Poria cocos</i>	Животные (молодые крысы). Внутривентрикулярное введение. Анализы фекальной микробиоты	↑ Бактерии, связанные с КЦЖК (например, <i>Lactobacillus</i> и <i>Bifidobacterium</i>) и их основной метаболизм; ↓ <i>Enterococcus</i>	[5]
<i>Macrocybe crassa</i>	Экстракты со смесью полисахаридных (4.1–4.5%), белковых (0.35–0.37%) и фенольных (3.05–6.40%) соединений	Моделирование работы ЖКТ <i>in vitro</i> и ферментация <i>in vitro</i> с использованием отдельных штаммов	↑ Лактобактерии (например, <i>L. sakei</i> и <i>L. plantarum</i>); ↓ Патогенные бактерии (например, <i>Salmonella spp.</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> и <i>Escherichia coli</i>)	[6]
<i>Pleurotus eryngii</i>	Полисахарид <i>Pleurotus eryngii</i> (состоит из Glc 78%, Man 9%, Gal 8%, Rib 0.4%, Ara 3% и Fuc 0.3%)	Моделирование работы ЖКТ <i>in vitro</i> и ферментация фекалий человека <i>in vitro</i>	↑ <i>Firmicutes</i> ; ↓ Бактероиды и протеобактерии; ↑ КЦЖК (например, уксусная и пропионовая кислоты)	[7]
<i>Pleurotus florida</i>	Экстракт полисахарида (68% β -глюканов)	Ферментация <i>in vitro</i> с отдельными штаммами	↑ Рост пробиотических штаммов (<i>Lactiplantibacillus plantarum</i>); ↑ КЦЖК (например, уксусная и пропионовая кислоты)	[8]

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
<i>Tremella fuciformis</i>	Четыре полисахаридных экстракта (88–91% полисахаридов; ММ: 18.6×10^5 Да; молекулярные соотношения: Man 1, GlcA 0.07–0.09, Glc 0.02–0.03, Xyl 0.30–0.32 и Fuc 0.19–0.20)	Моделирование работы ЖКТ <i>in vitro</i> и ферментация фекалий человека <i>in vitro</i>	↑ <i>Phascolarctobacterium</i> , <i>Lachnoclostridium</i> ; ↑ КЦЖК (например, уксусная и пропионовая кислоты)	[9]
<i>Volvariella volvacea</i>	Четыре полисахаридных экстракта (88–93% полисахаридов; ММ: 123.6–135.8 кДа; молекулярные соотношения: Gal 1.73–1.86, Glc 0.71–0.75, Man 0.71–0.72, GlcA 0.71–0.73)	Моделирование работы ЖКТ <i>in vitro</i> и ферментация фекалий человека <i>in vitro</i>	↑ Соотношение <i>Bacteroidetes</i> и <i>Firmicutes</i> ; ↑ <i>Bacteroides</i> и <i>Phascolarctobacterium</i> ; ↓ <i>Escherichia-shigella</i> ↑ КЦЖК (например, уксусная, пропионовая и масляная кислоты)	[10]
<i>Flammulina velutipes</i>	Экстракт полисахарида (содержащий остатки уроновой кислоты, связи (1→4)-β, пиранозные кольца и/или сульфатированное ароматическое кольцо; молекулярное соотношение: Glc 72, Man 7, Gal 14, Ara 4, Xyl 1.4, Fuc 0.59, Rib 0.59)	Животные (4-недельные мыши). Повреждение кишечника, вызванное CdCl ₂ . Введение через зонд. Трансплантация кишечной микробиоты. Анализ фекальной микробиоты. Биохимические анализы кишечника	↑ <i>Bacteroides</i> ; ↓ <i>Desulfovibrionales</i> и <i>Clostridium</i> ; ↑ КЦЖК (например, пропионовая и масляная кислоты); ↑ Гены тесного соединения (окклюдин и клаудин-1) и Гены рецепторов, связанных с G-белком (GPR43 и GPR109A); ↓ Провоспалительные цитокины (TNF-, IL-1, and IL-1β); ↓ Воспаление кишечника, модуляция проницаемости кишечника и барьерная трансплантация кишечных микробов способствуют аналогичным эффектам.	[11]
<i>Grifola frondose</i> , <i>Hypsizygus marmoreus</i> и <i>Pleurotus eryngii</i>	Коммерческий полисахаридный экстракт (Питательный состав: 20% пищевых волокон; Glc 33.5%)	Человек (18 здоровых добровольцев). Пероральный прием. Анализ фекальной микробиоты. Уровни IgA в кишечнике и метаболомика	↑ Группа <i>Eubacterium ventriosum</i> ; ↑ КЦЖК (например, пропионовая и масляная кислоты) Не оказывает существенного влияния на метаболизм; ↑ Уровни IgA в кишечнике	[12]
<i>Hericium erinaceus</i>	HEP (→4)-α-D-Glcp(1→, →3)-β-D-Glcp(1→, →6)-α-D-Glcp(1→ и α-D-Glcp(1→ остатки; молекулярная масса: 7.5×10^7 Да; молекулярное соотношение: Glc 56.7, Gal 24.2, Fuc 7.9, Man 5.9, ксил 2.3, GlcA 1.27, Ребро 1, МанА 0.5, Ара 0.3)	Клеточные (повреждение, вызванное акриламидом в клетке IEC-6) и животные (6-недельные самцы мышей) с нормальным и сниженным кишечным барьером. Введение через зонд. Тест HEP и ферментированного HEP (FHEP). Анализы фекальной микробиоты. Биохимические анализы	↑ Клеточный: FHEP; ↑ TEER и парацеллюлярная проницаемость HEP и HIP; ↑ Плотное соединение и экспрессия муцина Плотное соединение и экспрессия муцина Животных: повышают барьерную функцию кишечника; ↑ <i>Bacteroidetes</i> , <i>Firmicutes</i> ; ↓ <i>Klebsiella</i> , <i>Shigella</i> ; ↑ КЦЖК (например, уксусная, пропионовая и масляная кислоты); ↓ Провоспалительные цитокины (TNF-, IL-1, и IL-6) FHEP; ↑ Иммунные молекулы (IgA, IgG, и IgM); ↑ Окклюдин, ZO-1/-2, клодин -3/-4, MUC2; ↓ клодин -2	[13]

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
<i>Huangshan Floral Mushroom</i>	Экстракт полисахарида ((1→3)-β-глюкан; молекулярная масса: 7.2×10 ⁵ Да)	Животное (мышы в возрасте 6 недель). Индуцированный язвенный колит. Введение через зонд. Анализы фекальной микробиоты. Биохимические анализы кишечника	↑ Разнообразие микробиоты; ↓ Вредные бактерии; ↑ КЦЖК (например, уксусная и масляная кислоты). Регулирующий иммунный баланс организма Th17/Treg и секреция воспалительного фактора; ↓ Повреждение слизистого барьера кишечника; ↓ Язвенный колит	[14]
<i>Armillariella tabescens</i>	Водорастворимый полисахаридный экстракт ((1→4)-α-D-Glcp с ответвлениями в О-6 и оканчивающийся Т-α-D-Glcp; состоит из Glc 89% и Ara 7%)	Животные (мышы в возрасте 5/6 недель). Диабет, вызванный введением через зонд. Анализы фекальной микробиоты. Биохимические анализы почек и кишечника	↑ <i>Verrucomicrobiawas</i> ; ↓ <i>Proteobacteria</i> ; ↑ Белок плотного соединения, обеспечивающий барьерную функцию кишечника; ↓ Системное воспаление; ↓ содержание липополисахаридов и активация инфламмасом NLRP3; ↓ Повреждение почек в результате окислительного стресса	[15]
<i>Grifola frondosa</i>	Экстракт полисахарида (38.2%) и белка (37.8%) (GF500; MM >5000 Да; состоит из Glc 47%, Ara 30%, Man 19%, Rib 1.9%, Rha 1.7%, Xyl 0.3% и Gal 0.16%)	Животное (6-недельные крысы) Диабет, вызванный введением через зонд. Анализы фекальной микробиоты Биохимические анализы сыворотки, печени и кишечника	↑ Соотношение <i>Firmicutes</i> / <i>Bacteroidetes</i> , <i>Turicibacter</i> ; ↓ Уровень глюкозы в сыворотке крови натошак, резистентность к инсулину, липиды сыворотки крови; ↓ Уровни мРНК маркеров воспаления; ↓ Резистентность к инсулину, связанная с нарушениями обмена веществ	[16]
<i>Lentinula edodes</i>	Коммерческий лентинан (чистота >98%; Yuanye Biological Technology Co., Ltd., Китай)	Животное (9-недельные мышы). Неалкогольный стеатогепатит, вызванный пероральным введением. Анализы фекальной микробиоты. Биохимические анализы кишечника и печени	↑ <i>Bifidobacterium</i> ; ↓ <i>Proteobacteria</i> и <i>Epsilonbacteraeota</i> ; ↑ Целостность кишечного барьера и окислительно-восстановительный баланс; ↓ Стеатогепатит и NF-κBPTP1B-Akt-GSK3β (воспаление–инсулин); ↑ Чувствительность к инсулину	[17]
<i>Pleurotus eryngii</i>	Растворимый полисахаридный экстракт (69.6%; MM: 740 кДа; состоит из Glc 83%, Gal 9.2% и Man 8%)	Животное (6-недельные мышы). Вызванное ожирение. Пероральное введение. Анализ фекальных липидов и микробиоты. Метаболизм липидов и холестерина	↑ <i>Firmicutes</i> ; ↑ КЦЖК бактерии (например, <i>Anaerostipes</i>); ↑ Содержание липидов и общего количества желчных кислот в кале; ↑ Экспрессия генов LDLR в печени и GPR43 в жировой ткани; ↓ Уровень общего холестерина в сыворотке крови и холестерина ЛПНП; ↓ Увеличение веса и накопление жира	[18]
<i>Poria cocos</i>	Водорастворимый экстракт (полисахариды и полифенолы)	Животные (7-недельные мышы). Повреждения кожи, вызванные ультрафиолетовым излучением. Пероральный прием. Анализы фекальной микробиоты. Биохимические анализы кожи	↑ Бактерии, метаболизирующие энергию и КЦЖК; ↑ Длина ворсинок и содержание муцина; ↑ баланс муцинового барьера; ↓ Окислительный стресс и провоспалительные цитокины; ↓ Системные и кожные воспаления	[19]

Окончание таблицы

1	2	3	4	5
<i>Lentinula edodes</i>	Коммерческий экстракт β -глюкана (1 \rightarrow 3)- β /(1 \rightarrow 6)- β -глюканы, (1 \rightarrow 3)- β -глюкан или (1 \rightarrow 3)- β /(1 \rightarrow 4)- β -глюкан; Yuanye Biotechnology Co., Китай)	Животное (здоровые мыши в возрасте 9 недель). Пероральное введение. Анализы фекальной микрофлоры. Биохимические анализы тканей кишечника и мозга	Связь между кишечником и мозгом (когнитивные способности); \uparrow CD206-позитивные клетки (иммунный гомеостаз); \downarrow Провоспалительные цитокины (IL-6, TNF- α); \uparrow IL-10; \downarrow Микроглиоз в префронтальной коре и гиппокампе; \uparrow Уровни и ультраструктура синаптических белков; \uparrow Память для распознавания временного порядка	[20]
<i>Sparassis crispa</i>	Экстракт полисахарида (молекулярная масса: 1.4×10^4 Да; молекулярное соотношение: Glc 52, Gal 31, Fuc 15 и Man 1.8)	Животное (10-недельные мыши). Болезнь Альцгеймера, вызванная введением через зонд. Анализы фекальной микрофлоры. Биохимические анализы тканей кишечника и мозга	Изменение микрофлоры кишечника. \uparrow КЦЖК (например, уксусная и масляная кислоты); \uparrow Экспрессия белков плотного соединения толстой кишки; \downarrow Уровень липополисахаридов; \downarrow Провоспалительные цитокины (IL-6, TNF- α , IL-1 β); \downarrow Активация глии, TLR4 и NF- κ B; \uparrow Уровень нейротрансмиттеров; \downarrow нейропатологические изменения	[21]

Примечание: \uparrow – увеличение/стимулирование роста; \downarrow – уменьшение/ингибирование роста; ММ – молекулярная масса; КЦЖК – короткоцепочечные жирные кислоты; ЖКТ – желудочно-кишечный тракт; Ара – арабиноза; Fuc – фукоза; Gal – галактоза; Glc – глюкоза; GlcA – глюкуроновая кислота; GlcN – глюкозамин; Man – манноза; Rib – рибоза; Xyl – ксилоза; Th17 – Т-хелперные клетки 17; Treg – регуляторные Т-клетки; IgA – иммуноглобулин А; IgG – иммуноглобулин G; IgM – иммуноглобулин М; Zo-1 – Zonula occludens-1; Zo-2 – Zonula occludens-2; MUC2 – муцин 2; TEER – анализ трансэпителиального электрического сопротивления; PTP1B – протеинтирозинфосфатаза 1B; Akt – протеинкиназа B; GSK3 β – киназа гликогенсинтазы-3 бета; LDLR – рецептор липопротеинов низкой плотности; GPR43 – рецептор, сопряженный с G-белком 43; LDL – липопротеины низкой плотности; мРНК – мессенджер рибонуклеиновая кислота; LPS – липополисахариды; NLRP3 – нуклеотидсвязывающий домен семейства лейциновых повторов, содержащий 3 пириновых домена; CD206 – маннозный рецептор; TNF- α – фактор некроза опухоли- α ; IL – интерлейкин; TLR – толл-подобный рецептор; NF- κ B – ядерный фактор каппа-легкой цепи, усилитель активированных В-клеток.

Список литературы

1. Fu C., Ye K., Ma S., Du H., Chen S., Liu D., Ma G., Xiao H. Simulated gastrointestinal digestion and gut microbiota fermentation of polysaccharides from *Agaricus bisporus* // Food Chemistry. 2023. Vol. 418. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135849>.
2. Zhang Z., Zhao L., Qu H., Zhou H., Yang H., Chen H. Physicochemical characterization, adsorption function and prebiotic effect of chitin-glucan complex from mushroom *Coprinus comatus* // International Journal of Biological Macromolecules. 2022. Vol. 206, no. 12. Pp. 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.152>.
3. Lai Y., Fang Q., Guo X., Lei H., Zhou Q., Wu N., Song C. Effect of polysaccharides from Dictyophora indusiata on regulating gut microbiota and shortchain fatty acids in mice // Journal of Food Measurement and Characterization. 2022. Vol. 17. Pp. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01596-8>.
4. Khan I., Huang G., Li X., Leong W., Xia W., Hsiao W.L.W. Mushroom polysaccharides from *Ganoderma lucidum* and *Poria cocos* reveal prebiotic functions // Journal of Functional Foods. 2018. Vol. 41, no. 12. Pp. 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.046>.
5. Wang K.-L., Lu Z.-M., Mao X., Chen L., Gong J.-S., Ren Y., Geng Y., Li H., Xu H.-Y., Xu G.-H., Shi J.-S., Xu Z.-H. Structural characterization and anti-alcoholic liver injury activity of a polysaccharide from *Coriolus versicolor* mycelia // International Journal of Biological Macromolecules. 2019. Vol. 137. Pp. 1102–1111. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.242>.
6. Inyod T., Ayimbila F., Payapanon A., Keawsompong S. Antioxidant activities and prebiotic properties of the tropical mushroom *Macrocybe crassa* // Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre. 2022. Vol. 27, no. 9. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2021.100298>.
7. Ma J., Piao X., Mahfuz S., Long S., Wang J. The interaction among gut microbes, the intestinal barrier and short chain fatty acids // Animal Nutrition. 2022. Vol. 9. Pp. 159–174. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.09.012>.
8. Moumita S., Das B. Assessment of the prebiotic potential and bioactive components of common edible mushrooms in India and formulation of symbiotic microcapsules // LWT. 2022. Vol. 156. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113050>.

9. Wu D.T., An L.Y., Liu W., Hu Y.C., Wang S.P., Zou L. *In vitro* fecal fermentation properties of polysaccharides from *Tremella fuciformis* and related modulation effects on gut microbiota // *Food Research International*. 2022. Vol. 156. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111185>.
10. Hu W., Di Q., Liang T., Zhou N., Chen H., Zeng Z., Luo Y., Shaker M. Effects of *in vitro* simulated digestion and fecal fermentation of polysaccharides from straw mushroom (*Volvariella volvacea*) on its physicochemical properties and human gut microbiota // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 239. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124188>.
11. Hao R., Zhou X., Zhao X., Lv X., Zhu X., Gao N.N., Li D. *Flammulina velutipes* polysaccharide counteracts cadmium-induced gut injury in mice via modulating gut inflammation, gut microbiota and intestinal barrier // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 877. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162910>
12. Nishimoto Y., Kawai J., Mori K. Dietary supplement of mushrooms promotes SCFA production and moderately associates with *IgA* production. A pilot clinical study // *Front. Nutr.* 2023. Vol. 9. 1078060. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1078060>.
13. Su Y., Cheng S., Ding Y., Wang L., Sun M., Man C., Zhang Y., Jiang Y. A comparison of study on intestinal barrier protection of polysaccharides from *Hericium erinaceus* before and after fermentation // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 233. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123558>.
14. Zou M.Y., Wang Y.J., Liu Y., Xiong S.Q., Zhang L., Wang J.H. Huangshan floral mushroom polysaccharide ameliorates dextran sulfate sodium-induced colitis in mice by modulating Th17/Treg balance in a gut microbiota-dependent manner // *Molecular Nutrition & Food Research*. 2022. Vol. 67, no. 2. 2200408. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202200408>.
15. Yang R., Li Y., Mehmood S., Yan C., Huang Y., Cai J., Ji J. Polysaccharides from *Armillariella tabescens* mycelia ameliorate renal damage in type 2 diabetic mice // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 162. Pp. 1682–1691. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.006>.
16. Xiao C., Jiao C., Xie Y., Ye L., Li Q., Wu Q. *Grifola frondosa* GF5000 improves insulin resistance by modulation the composition of gut microbiota in diabetic rats // *Journal of Functional Foods*. 2021. Vol. 77. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104313>.
17. Yang X., Zheng M., Zhou M., Zhou L., Ge X., Pang N., Yu Y. Lentinan supplementation protects the gut–liver axis and prevents steatohepatitis: the role of gut microbiota involved // *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 8, no. 1. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.803691>.
18. Nakahara D., Nan C., Mori K., Hanayama M., Kikuchi H., Hirai S., Egashira Y. Effect of mushroom polysaccharides from *Pleurotus eryngii* on obesity and gut microbiota in mice fed a high-fat diet // *European Journal of Nutrition*. 2020. Vol. 59, no. 7. Pp. 3231–3244. <https://doi.org/10.1007/s00394-019-02162-7>.
19. Zhang T., Huang S., Qiu J., Wu X., Yuan H., Park S. Beneficial effect of *Gastrodia elata* Blume and *Poria cocos* wolf administration on acute UVB irradiation by alleviating inflammation through promoting the gut-skin Axis // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23, no. 18. <https://doi.org/10.3390/ijms231810833>.
20. Hu M., Zhang P., Wang R., Zhou M., Pang N., Cui X., Yu Y. Three different types of β -glucans enhance cognition: The role of the gut-brain Axis // *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9, no. 3. Pp. 1–14. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.848930>.
21. Zhang W., Guo Y., Cheng Y., Yao W., Qian H. Neuroprotective effects of polysaccharide from *Sparassis crispa* on Alzheimer's disease-like mice: Involvement of microbiota-gut-brain axis // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022. Vol. 225. Pp. 974–986. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.11.160>.