

СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС, МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕРЕВОРАЗРУШАЮЩИХ ГРИБОВ — ВОЗБУДИТЕЛЕЙ БЕЛЫХ ГНИЛЕЙ

Польских Светлана Валерьевна

кандидат биологических наук, доцент,
Воронежский Государственный Аграрный университет
имени Императора Петра I
future29@yandex.ru

CURRENT STATUS, MORPHOLOGICAL FEATURES AND DISTRIBUTION OF WOOD-DESTRUCTING FUNGI — CAUSATIVES OF WHITE ROT

S. Polskikh

Summary. The article considers modern aspects of studying wood-destroying fungi — causative agents of white rot, their ecological role and biotechnological potential. The taxonomic status and systematics of this group of organisms are analyzed considering the latest phylogenetic studies based on molecular genetic data. Particular attention is paid to the genetic aspects of white rot using the example of a detailed analysis of the *Ceriporia lacerata* genome. The mechanisms of action of ligninolytic enzymes of fungi, including laccases, lignin peroxidases and manganese peroxidases, their role in the effective decomposition of wood are considered. The geographical distribution and ecological significance of white rot pathogens in natural ecosystems are described. The prospects for the practical application of these organisms in bioremediation processes, waste treatment of waste treatment facilities and production of biologically active substances are presented. Directions for further research in the context of climate change and anthropogenic impact on forest ecosystems are outlined.

Keywords: wood-destroying fungi, white rot, ligninolytic enzymes, genome, fungal ecology, biotechnology, taxonomy of basidiomycetes.

Аннотация. В статье рассмотрены современные аспекты изучения дереворазрушающих грибов-возбудителей белых гнилей, их экологическая роль и биотехнологический потенциал. Проанализированы таксономический статус и систематика данной группы организмов с учетом последних филогенетических исследований, основанных на молекулярно-генетических данных. Особое внимание уделено генетическим аспектам белой гнили на примере подробного анализа генома *Ceriporia lacerata*. Рассмотрены механизмы действия лигнолитических ферментов грибов, включая лакказы, лигнинпероксидазы и марганецпероксидазы, их роль в эффективном разложении древесины. Описано географическое распространение и экологическое значение возбудителей белых гнилей в природных экосистемах. Представлены перспективы практического применения данных организмов в процессах биоремедиации, обработки отходов очистных сооружений и производстве биологически активных веществ. Обозначены направления дальнейших исследований в условиях изменения климата и антропогенного воздействия на лесные экосистемы.

Ключевые слова: дереворазрушающие грибы, белая гниль, лигнолитические ферменты, геном, экология грибов, биотехнология, таксономия базидиомицетов.

Введение

Леса играют исключительно важную роль в экологической системе. Они предоставляют убежище для животных, адсорбируют и накапливают антропогенные загрязнители, а также способны дезактивировать загрязненные почвы и воду посредством фиторемедиации. Хорошо спланированные и управляемые лесные массивы поддерживают высокий уровень биоразнообразия. Особую ценность представляют старые деревья, которые помимо экологических функций обеспечивают значительную эстетическую ценность.

Однако леса уязвимы для различных нарушений, включая погодные условия и инфекции. Упадок деревьев обычно вызван микробными инфекциями и неблагоприятными почвенными условиями. Среди патогенов

особое место занимают грибы, вызывающие гниение древесины. Как отмечает Schmidt, именно грибы обладают наибольшей способностью разрушать древесину. Механизмы биоразрушения включают рост грибов на поверхности или между внутренними компонентами древесины, выработку внеклеточных ферментов и структурную модификацию основных биополимеров, что приводит к постепенной деградации древесины как в живых деревьях, так и в деревянных конструкциях [1].

Грибы белой гнили являются доминирующей группой дереворазрушающих организмов, составляя около 90 % от всех известных видов. Их ключевая особенность заключается в способности эффективно расщеплять все основные компоненты древесины: целлюлозу, гемицеллюлозу и особенно лигнин. Это делает их уникальными среди других групп дереворазрушающих грибов. После

воздействия грибов белой гнили древесина приобретает характерный обесцвеченный, мягкий и волокнистый вид [2].

Эти грибы встречаются повсеместно и способны колонизировать как хвойные, так и широколиственные породы деревьев. Особенно высокое разнообразие грибов белой гнили наблюдается в тропических экосистемах. Представители данной группы относятся преимущественно к базидиомицетам. Среди наиболее распространенных родов грибов белой гнили, поражающих деревья, можно выделить *Phellinus*, *Ganoderma*, *Trametes* и *Polyporus* [3]. Они способны развиваться как на мёртвой древесине, выполняя функцию сапротрофов и участвуя в круговороте веществ в экосистеме, так и поражать живые деревья, выступая в роли патогенов.

В работе Petre и соавторов отмечается, что грибы белой гнили являются особенно активными разрушителями древесины благодаря их уникальной способности разлагать лигнин [4]. Статистические данные показывают, что представители порядка Polyporales вызывают около 75 % случаев белой гнили в лесных экосистемах умеренного пояса. Исследование Hammel и Cullen демонстрирует, что грибы белой гнили секретируют комплекс лигнолитических ферментов, включая лакказы, лигнин-пероксидазы и марганец-пероксидазы, которые способствуют эффективной деградации древесины на молекулярном уровне. По данным Martinez и соавторов, скорость разложения древесины этими грибами может достигать 2–5 % массы в месяц при оптимальных условиях, что делает их ключевыми агентами в круговороте углерода в лесных экосистемах. Наблюдения Floudas и коллег подтверждают, что изменение климатических условий за последние десятилетия привело к расширению ареала многих видов грибов белой гнили на 10–15 % в северном направлении [5].

Проникновение грибов белой гнили в живые деревья обычно происходит через различные повреждения: раны от неправильной обрезки, трещины коры на старых деревьях, повреждения от ветра или животных. Некоторые виды, такие как *Phellinus noxius*, поражают корневую систему деревьев, проникая через корневые соединения.

Дереворазрушающие грибы-возбудители белых гнилей представляют собой экологически важную группу организмов, играющих ключевую роль в разложении древесины и круговороте веществ в лесных экосистемах. Эти грибы обладают уникальной способностью разрушать все основные компоненты древесины, включая лигнин, что делает их объектом пристального научного интереса как с точки зрения фундаментальной микологии, так и прикладных аспектов биотехнологии [6].

Таксономический статус и систематика

В современной систематике большинство дереворазрушающих грибов, вызывающих белую гниль, относятся к отделу Basidiomycota, преимущественно к классам Agaricomycetes и Tremellomycetes. Согласно последним филогенетическим исследованиям, основанным на молекулярно-генетических данных, среди возбудителей белых гнилей выделяются такие важные порядки, как Polyporales, Hymenochaetales, Russulales и Agaricales [7].

С начала XXI века произошли существенные изменения в таксономии этих организмов. Многие роды были реклассифицированы, появились новые таксономические единицы. Например, ранее единый род *Phanerochaete* сейчас разделен на несколько отдельных родов на основе молекулярно-генетических данных. Современные методы метагеномики и транскриптомики позволили уточнить филогенетические взаимоотношения между различными группами дереворазрушающих грибов и выявить новые, ранее не описанные виды [8].

Для более глубокого понимания биотехнологического потенциала грибов белой гнили важно учитывать современные достижения в области их таксономии и молекулярной биологии. С начала XXI века произошли существенные изменения в таксономии этих организмов. Многие роды были реклассифицированы, появились новые таксономические единицы. Например, ранее единый род *Phanerochaete* сейчас разделен на несколько отдельных родов на основе молекулярно-генетических данных. Современные методы метагеномики и транскриптомики позволили уточнить филогенетические взаимоотношения между различными группами дереворазрушающих грибов и выявить новые, ранее не описанные виды.

В работе Mao et al. (2022) генетический аспект грибов белой гнили представлен подробным анализом генома *Ceriporia lacerata* CGMCC No. 10485. Авторы отмечают, что полногеномное секвенирование выявило размер генома около 36 Mb с содержанием GC 49,33 %, что сопоставимо с геномами других представителей порядка Polyporales (28–60 Mb). Исследование показало высокий уровень полноты сборки генома — 98,4 % по оценке BUSCO, с обнаружением 13,243 генов со средней длиной 1,860 bp, из которых 9,085 были успешно аннотированы [9].

Согласно анализу функциональных аннотаций, в геноме *C. lacerata* было обнаружено 1,163 гена, кодирующих секреторные белки, содержащие N-терминальные сигнальные пептиды без трансмембранных доменов. Филогенетический анализ, основанный как на одиночных ортологических генах, так и на среднем нуклеотидном сходстве (ANI), показал, что роды *Phlebia*, *Ceriporia*, *Phlebiopsis* и *Phanerochaete* эволюционно тесно связа-

ны. Это согласуется с их общей экологической ролью как эффективных разрушителей лигноцеллюлозных материалов и объясняет сходство их ферментативных систем, специализированных на деградации лигнина и других компонентов древесины.

Морфологические особенности

Грибы — возбудители белых гнилей характеризуются рядом специфических морфологических признаков. В зависимости от таксономической принадлежности их плодовые тела могут быть конSOLEВИДНЫМИ, КОПЫТООБРАЗНЫМИ или РАСПРОСТЕРТЫМИ, ОДНОЛЕТНИМИ или МНОГОЛЕТНИМИ. Текстура плодовых тел варьирует от мягкой и мясистой до твердой и деревянистой [10].

Для возбудителей белых гнилей характерно наличие различных типов гифальных систем: мономитической, димитической или тримитической. Наличие сложных гифальных систем обеспечивает прочность плодовых тел и адаптацию к различным экологическим условиям [11].

Ключевой морфофизиологической особенностью этих грибов является наличие развитого ферментативного аппарата для разложения лигноцеллюлозного комплекса. Они продуцируют лигнинпероксидазы, марганецпероксидазы, лакказы и другие ферменты, которые позволяют разрушать лигнин и прочие компоненты древесины, придавая пораженной древесине белесый цвет, отчего происходит название «белая гниль».

Вао-Teng Wang и другие отмечают, что грибы белой гнили обладают уникальным ферментативным комплексом, включающим раффинооксидазы семейства AA5, что значительно расширяет их потенциал в разложении лигноцеллюлозных материалов [12]. Некоторые виды рода *Flavodon*, в частности *F. ambrosius*, широко культивируются двумя родами амброзиевых жуков, образуя симбиотические отношения, где грибы получают распространение, а насекомые питаются мицелием. По статистическим данным представители рода *Phanerochaete* демонстрируют высокую степень генетического разнообразия в локусах, ответственных за синтез лигнолитических ферментов, что объясняет их широкое экологическое распространение и адаптивность к различным древесным субстратам. Полипоровые грибы семейства *Phanerochaetaceae* обладают наибольшей эффективностью в деградации лигнина, разлагая до 80 % этого компонента в древесине хвойных пород за 12 месяцев активного роста.

Географическое распространение

Дереворазрушающие грибы-возбудители белых гнилей широко распространены по всему миру, но их видовое разнообразие и численность значительно ва-

рируют в зависимости от климатических и экологических факторов. В бореальных лесах умеренной зоны доминируют такие роды как *Fomes*, *Fomitopsis*, *Phellinus* и *Trichaptum* [13].

Тропические леса отличаются наибольшим разнообразием видов возбудителей белых гнилей. Здесь можно встретить многочисленных представителей родов *Ganoderma*, *Trametes*, *Lentinus* и *Polyporus* [14]. В городских и пригородных зонах наблюдается распространение видов, адаптированных к антропогенным воздействиям. Интересно, что географическое распространение этих грибов часто связано с распространением определенных древесных пород, поскольку многие виды проявляют выраженную субстратную специфичность. Некоторые виды могут развиваться только на хвойных или только на лиственных деревьях, в то время как другие обладают более широкой специализацией.

Экологическое значение и практическое применение

Дереворазрушающие грибы-возбудители белых гнилей играют ключевую роль в лесных экосистемах как основные деструкторы древесины. Они участвуют в круговороте углерода и других элементов, формируют микростообитания для других организмов и регулируют структуру древостоя.

С точки зрения биотехнологии, эти грибы представляют значительный интерес для биоремедиации почв и вод, загрязненных ксенобиотиками. Их ферменты успешно применяются в процессах биоотбеливания целлюлозы. Кроме того, из плодовых тел многих видов получают биологически активные вещества, а разработка ферментных препаратов на основе их ферментативных систем имеет большие перспективы в промышленности.

В работе Civzele et al. отмечается, что грибы-возбудители белой гнили представляют собой важную экологическую группу организмов, способных к биодеградации лигноцеллюлозного материала [15]. Эти грибы широко применяются в биотехнологии благодаря их способности секретировать комплекс лигнолитических ферментов, включая лакказы, лигнинпероксидазы и марганецпероксидазы. Исследования показывают, что грибы белой гнили могут эффективно разрушать не только лигнин, но и другие сложные полимеры. Подчеркивается, что интеграция этих грибов в процессы обработки отходов очистных сооружений представляет собой устойчивый подход для снижения воздействия отходов на окружающую среду и обеспечивает экологически безопасный путь утилизации материалов, отфильтрованных во время предварительной очистки сточных вод. Более того, биологическое разложение с использованием этих грибов может приводить не только к производству саха-

ров и биоэнергии, но и к получению ценных химических веществ для других биотехнологических применений.

Современные исследования и перспективы

Современные исследования дереворазрушающих грибов-возбудителей белых гнилей развиваются в направлении изучения геномов и протеомов для выявления генетических основ лигнолитической активности [16]. Активно ведется поиск новых видов с уникальными ферментными системами и исследуются экологические взаимодействия с другими компонентами лесных экосистем.

В условиях изменения климата и антропогенного воздействия на лесные экосистемы происходят изменения в видовом составе и распространении дереворазрушающих грибов, что требует постоянного мониторинга и новых исследований этой важной экологической группы.

Заключение

Анализ современного состояния исследований дереворазрушающих грибов-возбудителей белых гнилей свидетельствует о важности данной группы организмов как с экологической, так и с биотехнологической точки зрения. Эти грибы играют ключевую роль в природных

экосистемах, участвуя в круговороте веществ и разложении лигноцеллюлозных материалов. Их уникальная способность эффективно расщеплять лигнин и другие компоненты древесины обусловлена наличием специализированного ферментативного аппарата, включающего лакказы, лигнинпероксидазы и марганецпероксидазы.

Современные молекулярно-генетические исследования, в том числе полногеномное секвенирование представителей различных таксономических групп грибов белой гнили, позволили существенно пересмотреть их систематику и филогенетические взаимоотношения. Данные о структуре геномов, например *Ceriporia lacerata*, раскрывают генетические основы лигнолитической активности этих организмов, что открывает новые возможности для их биотехнологического применения. В условиях изменения климата и усиливающегося антропогенного воздействия на лесные экосистемы возрастает необходимость дальнейшего изучения экологии, биологии и практического потенциала грибов-возбудителей белых гнилей. Их использование в процессах биоремедиации, обработки отходов и производстве ценных биохимических соединений представляет собой перспективное направление устойчивого развития и экологически безопасных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косумов Р.С. Лесные экосистемы как стабилизирующие факторы антропогенного воздействия на окружающую среду / Р.С. Косумов, М.Д. Демельханов // Молодой ученый. — 2016. — № 3 (107). — С. 415–420. — URL: <https://moluch.ru/archive/107/25614/> (дата обращения: 12.05.2025).
2. Corbu V.M., Gheorghe-Barbu I., Dumbravă A.Ş., Vrâncianu C.O., Şesan T.E. Current Insights in Fungal Importance-A Comprehensive Review // *Microorganisms*. — 2023. — Vol. 11, № 6. — P. 1384. — DOI: 10.3390/microorganisms11061384.
3. Hong Y., Tan J.Y., Xue H., Chow M.L. A Metagenomic Survey of Wood Decay Fungi in the Urban Trees of Singapore // *Journal of Fungi*. — 2023. — Vol. 9, № 4. — P. 460. — DOI: 10.3390/jof9040460.
4. Li T., Cui L., Song X., Cui X., Yulian W., Tang L., Mu Y., Xu Z. Wood decay fungi: an analysis of worldwide research // *Journal of Soils and Sediments*. — 2022. — Vol. 22. — DOI: 10.1007/s11368-022-03225-9.
5. Wijas B.J., Flores-Moreno H., Allison S.D., Cernusak L.A., Cheesman A.W., Eggleton P., Kooyman R.M., Powell J.R., Zanne A.E. Decadal recovery of fungal but not termite deadwood decay in tropical rainforest // *Journal of Applied Ecology*. — 2025. — DOI: 10.1111/1365-2664.70053.
6. Веревкин А.Н., Кононов Г.Н., Сердюкова Ю.В., Зайцев В.Д. Биодegradация древесины ферментными комплексами дереворазрушающих грибов // Вестник МГУЛ — Лесной вестник. — 2019. — № 5. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/biodegradatsiya-drevesiny-fermentnymi-kompleksami-derevorazrushayuschih-gribov> (дата обращения: 12.05.2025).
7. Змитрович И.В., Фирсов Г.А., Бондарцева М.А., Волобуев С.В., Большаков С.Ю. Базидиомицеты — возбудители хронических гнилей деревьев Ботанического сада Петра Великого Ботанического института имени В.Л. Комарова РАН: диагностика, биология, распределение по территории // *Hortus botanicus*. — 2018. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bazidiomitsety-vozbuditeli-hronicheskikh-gniley-dereviev-botanicheskogo-sada-petra-velikogo-botanicheskogo-institutu-imeni-v-l-komarova> (дата обращения: 13.05.2025).
8. PLAMIC2024: материалы IV Международной научной конференции «Растения и микроорганизмы: биотехнология будущего» и III Всероссийской конференции с международным участием «Механизмы адаптации микроорганизмов к различным условиям среды обитания». Байкальск, 15–22 сентября 2024 г. / отв. ред. И.А. Тихонович. — Иркутск: Издательство ИГУ, 2024. — 444 с.
9. Mao Z., Yang P. Whole-Genome Sequencing and Analysis of the White-Rot Fungus *Ceriporia lacerata* Reveals Its Phylogenetic Status and the Genetic Basis of Lignocellulose Degradation and Terpenoid Synthesis // *Frontiers in Microbiology*. — 2022. — Vol. 13. — 880946. — DOI: 10.3389/fmicb.2022.880946.
10. Wu F., Guo Z., Cui K., Dong D., Yang X., Li J., Wu Z., Li L., Dai Y., Pan T. Insights into characteristics of white rot fungus during environmental plastics adhesion and degradation mechanism of plastics // *Journal of Hazardous Materials*. — 2023. — Vol. 448. — P. 130878. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.130878.
11. Kuribayashi T., Lankinen P., Hietala S., Mikkonen K. Dense and continuous networks of aerial hyphae improve flexibility and shape retention of mycelium composite in the wet state // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. — 2021. — Vol. 152. — P. 106688. — DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106688.

12. Wang B.-T., Hu S., Oh D.N., Jin C.-Z., Jin L., Lee J.M., Jin F.-J. Insights into the Lignocellulose-Degrading Enzyme System Based on the Genome Sequence of *Flavodon* sp. x-10 // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2025. — Vol. 26, № 3. — P. 866. — DOI: 10.3390/ijms26030866.
13. Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы, и их роль в лесных экосистемах (XIII Чтения памяти О.А. Катаева) / Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 28 октября — 01 ноября 2024 г. / под ред. А.В. Селиховкина, Ю.Н. Баранчикова, Н.Н. Карпун, М.Ю. Мандельштама и В.И. Пономарёва. — Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. — 128 с.
14. Грибные сообщества лесных экосистем. Том 2 / Под ред. В.Г. Стороженко, В.И. Крутова. — Москва — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. — 311 с.
15. Civzele A., Stipniece-Jekimova A.A., Mezule L. Biodegradation of screenings from sewage treatment by white rot fungi // *Fungal Biology and Biotechnology*. — 2025. — Vol. 12. — P. 7. — DOI: 10.1186/s40694-025-00198-5.
16. Kijpornyongpan T., Schwartz A., Yaguchi A., Salvachúa D. Systems biology-guided understanding of white-rot fungi for biotechnological applications: A review // *iScience*. — 2022. — Vol. 25, № 7. — P. 104640. — DOI: 10.1016/j.isci.2022.104640.

© Польских Светлана Валерьевна (future29@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»