

Биозащита древесины от микробных повреждений (обзор)

© 2023. С. Г. Скугорева¹, к. б. н., н. с., Л. И. Домрачева^{1,2}, д. б. н., профессор,
Л. В. Трефилова², к. б. н., доцент, П. А. Стариков², аспирант,
Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

¹Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

³Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: skugoreva@mail.ru, dli-alga@mail.ru

Проведён обзор и анализ литературных данных о применении биометодов в защите древесины от действия микроорганизмов-деструкторов. Важную роль в защите древесины от деструкции играют такие микробы-антагонисты, как цианобактерии, бациллы и микромицеты р. *Trichoderma*. Их антагонистическая активность против микробов-биоразрушителей связана с синтезом летучих и нелетучих антибиотиков, липопептидов и ферментов-гидролаз, разрушающих те или иные компоненты клеток микробов-деструкторов или нарушающих процессы их метаболизма.

Многие природные соединения растительного (эфирные масла, танины, экстрактивные вещества древесины) и животного происхождения (прополис, хитозан) обладают большим потенциалом в биозащите древесины от биоповреждений благодаря своему уникальному природному составу, который приводит к нарушению жизнедеятельности микробов-деструкторов. Преимуществами природных соединений перед синтетическими антисептиками является их возобновляемость, рентабельность получения из отходов, нетоксичность и безвредность для окружающей среды. Недостатки, ограничивающие использование природных антисептиков: высокая гетерогенность в зависимости от источника, из которого они получены, лёгкое выщелачивание, неравномерная активность против отдельных видов грибов, высокая восприимчивость к биоразложению. Некоторые из этих недостатков можно преодолеть, сочетая органические биоциды с другими консервантами древесины.

Краткий обзор литературных данных показывает, что наряду с химическими методами защиты древесины от биоповреждений целесообразно использовать и биологические методы, которые хотя и уступают по эффективности первым, однако не оказывают вредного воздействия на окружающую среду. Особенно эффективным может оказаться совместное использование синтетических и природных антисептиков.

Ключевые слова: древесина, биоповреждения, биозащита, антисептики микробного, растительного и животного происхождения.

Bioprotection of wood from microbial damage (review)

© 2023. S. G. Skugoreva¹ ORCID: 0000-0002-5902-5187[†]

L. I. Domracheva^{1,2} ORCID: 0000-0002-7104-3337[†], L. V. Trefilova² ORCID: 0000-0002-9932-5803[†]

P. A. Starikov² ORCID: 0000-0002-3205-6696[†], T. Ya. Ashikhmina^{1,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047[†]

¹Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

³Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: skugoreva@mail.ru, dli-alga@mail.ru

mycetes of g. *Trichoderma* play an important role in protecting wood from destruction. Their antagonistic activity against biodegrading microbes is associated with the synthesis of volatile and nonvolatile antibiotics, lipoproteins and hydrolase enzymes that destroy certain components of cells of wood-destructing microbes or disrupt their metabolic processes.

Many natural compounds of vegetable (essential oils, tannins, extractive substances of wood) and animal origin (propolis, chitosan) have great potential in the bioprotection of wood from biodamage, due to their unique natural composition, which leads to disruption of the vital activity of destructor microbes. The advantages of natural compounds over synthetic antiseptics are their renewability, cost-effectiveness of obtaining from waste, non-toxicity and environmental friendliness. Disadvantages that limit the use of natural antiseptics are high heterogeneity depending on the source from which they are obtained, easy leaching, uneven activity against certain fungal species, high susceptibility to biodegradation. Some of these shortcomings can be overcome by combining organic biocides with other wood preservatives.

A brief review of the literature data shows that, along with chemical methods of protecting wood from biodamage, it is advisable to use biological methods, which, although inferior in efficiency to the first, do not have a harmful effect on the environment. The combined use of synthetic and natural antiseptics can be especially effective.

Keywords: wood, biodamage, biosecurity, antiseptics of microbial, plant and animal origin.

Использование изделий из древесины насчитывает несколько тысячелетий. И в наше время, несмотря на появление огромного количества искусственных материалов, интерес к подобным изделиям не угасает. Древесина не заменима при строительстве жилых и производственных зданий, изготовлении мебели, плавающих конструкций, спортивного инвентаря, детских игрушек и т. д. Однако по-прежнему человечество сталкивается с проблемой порчи деревянных изделий из-за совокупности действующих на неё абиотических и биотических факторов: влажности, кислотности среды, солевых и температурных воздействий, микробов-деструкторов и т. п. Проблема биоповреждения древесины, которая уже не является растущим деревом, а включена в производство, связана с тем, что целлюлоза – прекрасный органический субстрат, пища для различных групп микроорганизмов, в первую очередь, грибов. Воздействие микроорганизмов провоцирует появление различных разноцветных пятен, покрытие поверхности плесенью, что приводит к снижению прочности древесины [1]. Микробные популяции в биоматериале могут быть очень разнообразными, что зависит от факторов внешней среды, возраста древесины, условий хранения, температуры, влажности, состава эпифитов живого дерева и т. д. Поэтому необходима разработка комплекса мероприятий, основанных как на изучении механизма воздействия на древесину её разрушителей, так и на подборе биопрепаратов и соединений, способных остановить активность разрушителей древесины.

В настоящее время разработаны методики выделения, культивирования и последующего изучения физиологии и биохимии дереворазрушающих, деревоокрашивающих грибов и бактерий для более глубокого исследования их реакций на действие различных антисептиков [2].

Подобные работы облегчают поиск и испытание наиболее надёжных, эффективных и по возможности дешёвых способов защиты древесины от губительных для неё факторов. Безусловно, в большей степени используются способы защиты древесины, основанные на применении различных антисептиков, механизм действия которых обусловлен блокированием микробных ферментов, вызывающих деструкцию древесины [3]. Среди защитных антисептиков в последние годы распространение получили препараты, синтезируемые из промышленных отходов различных производств [4, 5].

Наряду с этим появляется всё больше сведений об использовании органических соединений растительного и животного происхождения, а также использования биопрепаратов, содержащих культуры микробов-антагонистов, нарушающих деструктивный потенциал разрушителей древесины.

Цель данной работы – обзор и анализ литературных данных о возможности применения биологических методов в защите древесины от действия микроорганизмов-деструкторов.

Объекты и методы исследования

Для написания обзора использованы литературные источники с 1993 по 2022 гг. из базы данных научной электронной библиотеки. Обсуждаются и анализируются публикации ведущих отечественных и зарубежных учёных-исследователей о роли микробов-разрушителей древесины и бактерий-антагонистов, проявляющих способность к биозащите древесины от биоповреждений благодаря своей способности нарушать жизнедеятельность микробов-деструкторов.

Поиск источников проводили при помощи поисковых систем Яндекс и Google, а также на сайте eLIBRARY.RU по поисковым запросам:

«микробные повреждения древесины», «фитопатогены древесины», «микробы-деструкторы древесины», «микробы-антагонисты», «защита древесины», «эфирные масла», «дубильные вещества», «экстрактивные вещества», «хитозан», «прополис».

Микробы – потенциальные агенты в защите древесных изделий от разрушения

Биоповреждение древесины провоцируется не только микробами-сапрофитами, но и микробами-оппортунистами, которые в отсутствие живых растений способны в качестве источника питания переходить на использование мёртвой древесины. Древесина, используемая людьми для приготовления различных изделий, представляет в этом плане полноценный субстрат питания для многих групп микроорганизмов. Вероятно, остановку размножения и развития подобных целлюлозолитиков способны осуществлять те же группы микроорганизмов, которые используют для борьбы с фитопатогенами.

Обзор литературных данных показывает, что наиболее перспективными в этом плане можно считать следующие группы антагонистов: цианобактерии, бациллы и микромицеты р. *Trichoderma*, которых объединяет несколько общих особенностей. К их числу относятся высокая степень адаптации к стрессовым условиям внешней среды; достаточно высокие темпы размножения многих видов; наличие особых морфологических структур, обеспечивающих переживание неблагоприятных условий; выделение экзометаболических веществ, нарушающих жизненные процессы чужеродных спутников. Поэтому в данном обзоре мы остановимся только на этой группе микробов-антагонистов.

Среди цианобактерий наивысшая способность к синтезу антагонистических метаболитов отмечается у представителей родов *Phormidium*, *Microcoleus*, *Fischerella*, *Nostoc*, *Anabaena* [6–11]. Среди экзометаболических веществ встречаются полипептиды, аминокислоты, полисахариды, органические кислоты, алкалоиды, антибиотики [12]. В частности, к числу цианобактериальных экзометаболических антагонистов относятся липопептиды, выделенные из наземной цианобактерии *Nostoc commune*. Из экскретов *Fischerella ambigua* выделен циклический полимер парсигин и алкалоиды амбигол А и амбигол В, обладающие антигрибной активностью. Антигрибная активность отмечена и для другой цианобактерии этого рода

F. muscicola [13–18]. Способностью выделять вещества антибактериальной и антигрибной активности обладают не только отдельные виды цианобактерий, но и природные бактериальные сообщества. Показано, например, что в культуральной среде подобных сообществ находятся насыщенные, ненасыщенные и ароматические углеводороды, карбоновые кислоты, фенольные и терпеновые соединения и их производные [19].

Кроме того, особенность физиологии цианобактерий заключается ещё и в том, что их экзометаболические продукты являются местом размножения целого ряда сапротрофных бактерий, многие из которых обладают антагонистическими свойствами, при этом их биомасса может составлять от 3 до 12% биомассы цианобактерий [20].

Виды грамположительных бактерий р. *Bacillus* известны как наиболее используемые в биотехнологических производствах с целью получения биопрепаратов и метаболитов, применяемых в медицине, ветеринарии, сельском хозяйстве, пищевой промышленности. Так, одним из достоинств бактерий этого рода является способность к спорообразованию в неблагоприятных условиях и, следовательно, возможность длительного хранения бактериальных культур или биопрепаратов без потери полезных свойств. Выявлены важные для биозащиты от разрушения свойства бацилл. К ним, в частности, можно отнести способность синтезировать и выделять в окружающую среду липопептиды [21]. Липопептиды бацилл очень многообразны, устойчивы к гидролизу чужеродными пептидазами, нечувствительны к окислению и действию высоких температур. Антибиотические свойства бациллярных липопептидов связывают с их способностью нарушать проницаемость цитоплазматической мембраны микробных клеток, формировать в ней поры и, в конечном итоге, разрушать микробную клетку [22–24]. Особый акцент антибиотической активности липопептидов бацилл делается на снижении деструкционной активности фузариев, способных разрушать как живую, так и мёртвую древесину [24]. Эффективность антифузариозного контроля с помощью бацилл базируется не только на синтезе антибиотиков, но и способности бактерий данного рода к продуцированию литических экзоферментов (хитиназы, протеазы, глюканызы), разрушающих клеточную стенку грибов [25].

Изучение возможности использования бацилл-антагонистов для биоконтроля грибов,

разрушающих сырую древесину, выявило их способность к синтезу миколитических ферментов и проявление морфологических изменений грибов-разрушителей в формировании на развивающихся гифах сферопластов [26].

Среди представителей этого рода особое место занимает *B. subtilis*, биохимическим особенностям, а также антибактериальным, антигрибным, противовирусным способностям которой посвящены десятки работ. В частности, в ряде обзоров подчёркивается, что состав химических соединений, выделяемых *B. subtilis*, определяется её генетическими особенностями и условиями окружающей среды. Способность к синтезу вторичных метаболитов, таких как липопептидные антибиотики, позволяет данному виду бацилл действовать угнетающе более чем на 20 видов фитопатогенов [27–29]. К числу таких антибиотиков относятся сурфактин, микосубтилин, итурин, бацилломицин, действие которых на грибные и бактериальные клетки проявляется в формировании ионопроницаемых пор в цитоплазматической мембране угнетаемых клеток [30–32].

Микромицеты р. *Trichoderma* давно известны как активные продуценты широкого спектра биологически активных веществ, включая экзоферменты, разрушающие полимеры различного происхождения [33–36]. Препараты на основе грибов р. *Trichoderma* используются для защиты круглого леса: *T. harzianum* и *T. lignorum* подавляют развитие плесневых грибов на поверхности сырой древесины [4].

Биологическое снижение воздействия фитопатогенов, в том числе, дереворазрушающих грибов, представители р. *Trichoderma* осуществляют путём прямого паразитизма, конкуренции и синтеза антибиотических соединений, при этом во многом данные механизмы являются взаимодополняющими и действуют синергично [37]. Представители *Trichoderma* spp. продуцируют широкий спектр антимикробных соединений, в том числе ферменты, разрушающие клеточную стенку мишени, сидерофоры, хелатирующие железо, а также значительное количество летучих и нелетучих антибиотиков [38]. Выявлен штамм *T. viride*, выделяющий водорастворимые антибиотики, подавляющие развитие биодеструкторов родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Chaetomium* [39]. Не только водорастворимые антибиотики, но и ряд летучих органических соединений, продуцируемых триходермой, например, альдегидной природы (гептаналь и октаналь),

способны проявлять антимикотическую активность в условиях *in vitro* [40].

При этом, синтез и, как следствие, антимикробная активность таких соединений зависит от условий культивирования, в частности, от питательной среды. Например, при выращивании на солодовом агаре летучие соединения триходермы оказывали ингибирующее влияние на все исследованные тест-культуры, в то время как эффект был незначительным при культивировании на минимальной агаровой среде [41].

Таким образом, антагонистическая активность цианобактерий, бацилл и триходермы против микробов-биоразрушителей древесины имеет сходные механизмы, связанные с синтезом летучих и нелетучих антибиотиков, липопротеидов и ферментов-гидролаз, разрушающих те или иные компоненты клеток микробов-деструкторов или нарушающих процессы их метаболизма.

Вещества растительного происхождения, защищающие древесину

В защите древесины от микробных повреждений особая роль принадлежит веществам растительного происхождения. Высокой антагонистической активностью обладают такие вещества вторичного происхождения, как эфирные масла, танины, экстрактивные вещества древесины, которые можно рассматривать в качестве альтернативы химическим антисептикам.

Эфирные масла, образуемые растениями, – летучие, с характерным сильным запахом и вкусом, маслянистые, нерастворимые в воде, в основном бесцветные или слабоокрашенные жидкости. Имеют чрезвычайно сильные физиологические и фармакологические свойства. Установлена высокая противогрибковая эффективность масел бедренца анисового (*Pimpinella anisum*), базилика душистого (*Ocimum basilicum*), тмина обыкновенного (*Carum carvi*), душицы обыкновенной (*Origanum vulgare*), тимьяна обыкновенного (*Thymus vulgaris*) [42], коричника цейлонского (*Cinnamomum zeylanicum*) [43], членобородника лимонного (*Cymbopogon citratus*), пеларгонии ароматной (*Pelargonium graveolens*), гвоздичного дерева (*Syzygium aromaticum*) [44], сосны жёсткой (*Pinus rigida*), эвкалипта камальдульского (*Eucalyptus camaldulensis*) [45], нима индийского (*Azadirachta indica*) [46]. Она обусловлена присутствием в маслах монотерпенов: β-цитронеллола, карвакрола, цитраля,

эвгенола, изоэвгенола, гераниола, тимола, коричневого и α -метилкоричного альдегидов, 2-метилкоричной кислоты, α -кадинола, элемола и азадирахтина [47]. Недостатком использования масел является то, что они легко выщелачиваются из древесины, что делает их непригодными для защиты древесины, эксплуатируемой на открытом воздухе [43].

Танины. Танины или дубильные вещества – это полифенольные природные соединения, вырабатываемые большинством высших растений для защиты их от патогенных микроорганизмов и насекомых. Хвойные деревья считаются главным источником танинов [48]. Высокая противогрибковая активность установлена для экстрактов из коры сосны приморской (*Pinus pinaster*), сосны калабрийской (*Pinus brutia*), пихты Нордмана (*Abies nordmanniana*), казуарины хвощевидной (*Casuarina equisetifolia*) [49], из листьев дуба валония (*Quercus macrolepis*) [50].

Недостаток использования танинов как антисептиков – их плохая фиксация в структуре древесины и быстрое выщелачивание. Для закрепления танинов в клеточной стенке древесины могут быть использованы отвердители, например, гексамин, химическая модификация танинов и удаление низкомолекулярных соединений путём диализа [51].

Экстрактивные вещества древесины. Некоторые породы древесины обладают высокой естественной устойчивостью к гниению из-за присутствия различных экстрактивных веществ, которые представляют собой разнообразные неструктурные компоненты древесины, вырабатываемые в качестве защиты от стрессов, в основном находящиеся в сердцевине древесины. Их можно разделить на две группы: алифатические, алициклические соединения (терпеноиды и терпены) и фенольные соединения (флавоноиды и дубильные вещества). Их противогрибковая эффективность может быть основана на различных механизмах, включая прямое взаимодействие с ферментами грибов, нарушение структуры клеточных стенок и клеточных мембран или антиоксидантную активность [52, 53].

Потенциально промышленные отходы от обработки прочных пород древесины могут служить источником натуральных коммерчески выгодных биоцидов, которые можно использовать для обработки менее прочной древесины.

Высокой прочностью и устойчивостью к грибковому разложению характеризуется тиковое дерево (*Tectona grandis*) за счёт таких

экстрактивных соединений, как антрахиныны, тектохиноны, дезоксилапахол, изолапахол и дегидротектол [54, 55].

Устойчивость непрочной сердцевины ели европейской (*Picea abies*) к бурой гнили обусловлена наличием фунгитоксичной гидрофобной смолы, а среднепрочной сердцевины лиственницы курильской (*Larix kurilensis*) – большим количеством различных антиоксидантов [56].

Показана противогрибковая активность экстрактов коричника камфорного (*Cinnamomum camphora*), обусловленная присутствием в экстракте камфоры и α -терпинеола [57].

Экстракты древесины псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii*), кипариса нутканского (*Callitropsis nootkatensis*), можжевельника западного (*Juniperus occidentalis*), калоцедруса низбегающего (*Calocedrus decurrens*) могут уменьшить рост плесени [58], но не способны полностью защитить древесину от патогенных микромицетов. Поэтому в качестве потенциальной альтернативы традиционным системам защиты древесины можно рассматривать только многокомпонентные экстракты.

Наиболее распространённые проблемы древесных экстрактов, применяемых для противогрибковой обработки древесины – непостоянство биологической активности, вымываемость из древесины. Чтобы решить проблему вымываемости, необходима фиксация экстрактов на поверхности древесины с помощью ферментативных реакций [59].

Экстракты других растений. Экстракты камелии китайской (*Camellia sinensis*) и кофе арабийского (*Coffea arabica*) показали высокое ингибирующее действие на грибы [60]. Механизм фунгистатической активности кофеина включает его повреждающее действие на клеточную стенку и клеточную мембрану грибов [61].

Водные экстракты кофейной серебристой кожицы (отход промышленного процесса обжарки кофе) содержат хлорогеновую кислоту и производные кофеина, способные ингибировать рост и развитие патогенных грибов [62].

Несмотря на перспективность защиты древесины от патогенных грибов, кофеин легко выщелачивается из древесины, что является его основным недостатком. Стабилизировать кофеин внутри структуры древесины можно с помощью кремнийорганических соединений [63].

Низкие концентрации экстракта ядовитого растения олеандра обыкновенного (*Nerium*

oleander) обладают противогрибковой активностью [64]. Экстракты лишайника усней бородатой (*Usnea filipendula*) и омелы белой (*Viscum album*) снижали восприимчивость древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) к грибковому поражению [65].

Умеренные противогрибковые свойства экстракта акации ивовой (*Acacia saligna*) обусловлены присутствием бензойной кислоты, кофеина, нарингенина и кверцетина [66]. Экстракты плодов витании снотворной (*Withania somnifera*) значительно ограничивали рост мицелия патогенных грибов [67]. Противогрибковая активность этих экстрактов обусловлена действием алкалоидов, флавоноидов, гликозидов, сапонинов и дубильных веществ.

Вещества животного происхождения, защищающие древесину

Высокой эффективностью в защите древесины от биоповреждений обладают такие вещества животного происхождения, как прополис и хитозан.

Прополис в защите древесины. Прополис – продукт жизнедеятельности пчёл, вырабатываемый ими для укрепления сот, покрытия стенок ульев. Противогрибковый эффект экстракта прополиса в основном обусловлен флавоноидными и фенольными компонентами, особенно хризинном, галанином, пинобанксином, коричной кислотой, кофейной кислотой и их производными [68].

Этанольный экстракт прополиса эффективен против плесневых грибов, встречающихся в древесине [69]. Доказана противогрибковая эффективность этанольного экстракта прополиса в отношении *Penicillium notatum*: подавление роста мицелия, разрушение структуры гиф и проницаемости клеточной мембраны [70]. Метанольные экстракты прополиса оказывали антифунгальное действие на грибы при обработке древесины сосны обыкновенной и павлонии [71]. Древесина тополя, обработанная раствором прополиса более устойчива к *Trametes versicolor*, чем необработанная древесина [72].

К недостаткам использования прополиса можно отнести высокую чувствительность обработки прополисом к вымыванию; снижение противогрибкового действия с течением времени, что может быть связано с биоразлагаемостью отдельных ингредиентов прополиса [72, 73].

Хитозан в защите древесины. Хитозан – полисахарид, являющийся компонентом хити-

на. Источниками получения хитина являются панцири членистоногих и биомасса микро- и макромицетов грибов.

Хитозан может использоваться для защиты древесины от действия патогенных микромицетов. Древесина тсуги канадской (*Tsuga canadensis*), обработанная хитозаном, была более устойчива к действию бурой и белой гнили, чем необработанная древесина [74]. Древесина бука городчатого (*Fagus crenata*), сосны густоцветковой (*Pinus densiflora*) и криптомерии японской (*Cryptomeria japonica*), обработанная хитозаном, более устойчива к грибам-разрушителям по сравнению с необработанной древесиной [75].

При обработке мини-блоков из сосны обыкновенной 4,8% раствором высокомолекулярного хитозана выявлена их устойчивость к действию патогенных и сапрофитных грибов [76].

Хитозан в концентрации 2% обладает фунгицидной активностью по отношению к деревоокрашивающим грибам. Хитозановое покрытие обеспечивает достаточно эффективную защиту пиломатериалов и при сроках хранения не более 10 дней не требует применения дополнительных антисептиков [77].

Установлена противогрибковая эффективность 5% раствора низкомолекулярного хитозана, используемого при обработке древесины из сосны обыкновенной и бука [78]. Показана эффективность обработки хитозаном сосны смоляной (*Pinus resinosa*) против микромицетов, выделенных с археологических образцов древесины, при этом эффективность защиты увеличивается с ростом его концентрации [79].

Хитозан может образовывать мембрану внутри структуры древесины, которая является барьером для влаги, воздуха и задерживает другие частицы, препятствуя их вымыванию из древесины [78]. Применение его в сочетании с консервантами на основе меди, цинка, серебра, хромированного арсената меди или тебуконазолом приводит к более эффективной защите древесины от плесени [63].

Применение комплексного подхода в борьбе с дереворазрушающими грибами с использованием *Trichoderma harzianum* в сочетании с хитозаном показывает высокую эффективность [80].

Таким образом, природные соединения растительного и животного происхождения представляют огромный потенциал в защите древесины, поскольку обладают широким спектром антимикробной активности. Они являются

возобновляемыми, легкодоступными или рентабельно получаемыми из отходов, нетоксичны или обладают гораздо меньшей токсичностью, чем традиционные химические биоциды, и безвредны для окружающей среды. Однако они также имеют некоторые ограничения, в том числе высокую гетерогенность в зависимости от источника, из которого они получены (например, прополис, эфирные масла, экстракты древесины), отсутствие надлежащего удерживания внутри пропитанной древесной ткани, лёгкое выщелачивание, селективную или неравномерную активность против отдельных видов грибов, высокую восприимчивость к биоразложению. Некоторые из этих недостатков можно решить, сочетая органические биоциды с другими консервантами древесины.

Заключение

Анализ литературных источников по возможности использования биометодов в защите древесины от деструктивной активности бактерий и грибов показывает, что важную роль в этом процессе могут играть такие микробы-антагонисты, как цианобактерии, бациллы и триходерма. Их способность к микростатическому или микробоцидному действию базируется на синтезе и выделении экзометаболитов, обладающих антибиотической и ферментативной активностью, которые приводят к тем или иным нарушениям в структуре или функционировании микробов-разрушителей древесины.

Природные соединения растительного (эфирные масла, дубильные вещества, экстрактивные вещества древесины) и животного происхождения (прополис, хитозан) обладают существенным потенциалом в биозащите древесины от биоповреждений, благодаря своей способности нарушать жизнедеятельность микробов-деструкторов. Большим их достоинством являются возобновляемость, рентабельность получения из отходов, нетоксичность по сравнению с минеральными биоцидами и безвредность для окружающей среды.

Безусловно, полный переход на биозащиту от биоповреждений с помощью микробиологических препаратов или препаратов животного и растительного происхождения не реален. Всегда в приоритете будут химические методы защиты, однако даже краткий обзор литературных данных показывает, что в арсенал методов защиты древесины от биоповреждений целесообразно включать и био-препараты.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.

References

1. Kunitskaya O.A. Biotechnological way to protect wood from fungal infections // Aktualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. 2014. V. 2. No. 4–3 (9–3). P. 440–444 (in Russian). doi: 10.12737/6197
2. Leonovich O.K., Antonik A.Yu. Determination of the predominant cultures of wood-destroying and wood-staining fungi, their impact on wood // Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopolzovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov. 2017. No. 2 (198). P. 299–304 (in Russian).
3. Skugoreva S.G., Trefilova L.V., Domracheva L.I., Kantor G.Ya., Ashikhmina T.Ya. Protection of wood from destruction using antiseptics obtained from industrial waste (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 6–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-006-013
4. Mazanik N.V. Modern bioprotective agents for wood // Trudy BGGU. No. 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost. 2011. No. 2. P. 181–184 (in Russian).
5. Moldurushku M.O. The arsenic-containing production waste issue // Prirodnye resursy, sreda i obshchestvo. 2020. No. 2 (6). P. 76–78 (in Russian). doi: 10.24411/2658-4441-2020-10019
6. Naga Pavan Kumar B., Mahaboobi S., Satyam S. Cyanobacteria: a potential natural source for drug discovery and bioremediation // Jr. of Industrial Pollution Control. 2016. V. 32. No. 2. P. 508–517.
7. Thummajitsakul S., Silprasit K., Sittipraneed S. Antibacterial activity of crude extracts of cyanobacteria *Phormidium* and *Microcoleus* species // Biology African Journal of Microbiology Research. 2012. V. 16. No. 10. P. 2574–2579. doi: 10.5897/AJMR12.152
8. Singh J., Mishra S.K., Dwivedi N. Antibacterial activity of *Fischerella muscicola* NDUPC001 // IOSR Journal of Biotechnology and Biochemistry. 2017. V. 3. No. 4. P. 87–90. doi: 10.18520/cs/v116/i7/1229-1233
9. Chakdar H., Jadhav S.D., Dhar D.W., Pabbi S. Potential applications of blue green algae // Journal of Scientific & Industrial Research. 2012. V. 71. P. 13–20.
10. Osman R.K., Goda H., Higazy A.M. Evaluation of some extra- and intracellular cyanobacterial extracts as antimicrobial agents // International Journal of Advanced Research. 2015. V. 3. No. 5. P. 852–864.
11. Kumar B.N.P., Manaboobi S., Satyam S. Cyanobacteria: a potential natural source for drug discovery and

- bioremediation // Jr. of Industrial Pollution Control. 2016. V. 32. No. 2. P. 508–517.
12. Domracheva L.I., Fokina A.I., Kovina A.L., Ashikhmina T.Ya. Exometabolites of soil cyanobacteria as a survival strategy in natural and technogenically disturbed ecosystems // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 4. P. 15–23 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-015-023
13. Kajiyama S., Kanzaki H., Kawazu K., Kobayashi A. *Nostoc* fungicide, an antifungal lipopeptide from the field grown terres trial blue-green alga *Nostoc commune* // Tetrahedron Lett. 1998. V. 39. No. 22. P. 3737–3740.
14. Prasanna R., Nain L., Tripathi R., Gupta V., Chaudhary V., Middha S., Joshi M., Ancha R., Kaushic B.D. Evaluation of fungicidal activity of extracellular filtrates of cyanobacteria – possible role of hydrolytic enzymes // J. Basic Microbiol. 2008. V. 48. No. 3. P. 186–194.
15. Pawar S.T., Puranik P.R. Screening of terrestrial and freshwater halotolerant cyanobacteria for antifungal activities // World J. Microbiol. and Biotechnol. 2008. V. 24. No. 7. P. 1019–1025.
16. Falch B.S., König G.M., Wright A.D., Sticher O. Ambigol A and B: New biological active polychlorinated aromatic compounds from the terrestrial blue-green alga *Fischerella ambigua* // J. Org. Chem. 1993. V. 58. P. 6570–6575. doi: 10.1002/chin.199412284
17. Smitka T.A., Bonjouklian R., Doolin L., Jones N.D., Deeter J.B., Yoshida W.Y., Prinsep M.R., Patterson G.M.L. Ambiguine isonitriles, fungicidal hapalindole-type alkaloids from three genera of blue-green algae belonging to Stigonemataceae // J. Org. Chem. 1992. V. 57. No. 3. P. 857–861. doi: 10.1021/jo00029a014
18. Papke U., Gross E.M., Francke W. Isolation, identification and determination of the absolute configuration of fischerellin B. A new algicide from the freshwater cyanobacterium *Fischerella ambigua* (Thuret.) // Tetrahedron Lett. 1997. V. 38. No. 3. P. 379–382. doi: 10.1016/S0040-4039(96)02284-8
19. Bataeva Yu.V., Kurashov E.A., Krylova Yu.V. Chromato-mass-spectrometric study of exogenous metabolites of algal-bacterial communities in enrichment culture // Voda: khimiya i ekologiya. 2014. No. 9 (75). P. 59–68 (in Russian).
20. Tiberkevich N.Ya., Sakevich A.I. Companion bacteria in cultures of cyanoprokaryotes and green algae // Hidrobiologicheskii zhurnal. 2001. V. 37. No. 1. P. 54–63 (in Russian).
21. Maksimov I.V., Singh B.P., Cherepanova E.A., Burkhanova G.F., Khairullin R.M. Prospects for the use of bacteria – producers of lipopeptides for plant protection (review) // Applied Biochemistry and Microbiology. 2020. V. 56. No. 1. P. 15–284. doi: 10.1134/S0003683820010135
22. Fira D., Dimkić I., Berić T., Lozo J., Stanković S. Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species // J. Biotechnology. 2018. V. 285. No. 1. P. 44–55. doi: 10.1016/j.jbiotec.2018.07.044
23. Fiedler S., Heerklotz H. vesicle leakage reflects the target selectivity of antimicrobial lipopeptides from *Bacillus subtilis* // Biophys. J. 2015. V. 109. No. 10. P. 2079–2089. doi: 10.1016/j.bpj.2015.09.021
24. Sidorova T.M., Asaturova A.M., Allahverdyan V.V. Features of antagonism of bacteria of the genus *Bacillus* in relation to toxicogenic fungi *Fusarium* in the protection of plants from disease and contamination with mycotoxins (review) // South of Russia: ecology, development. 2021. V. 16. No. 4. P. 86–103 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2021-4-86-103
25. Kang X., Zhang W., Cai X., Tong Z., Xue Y., Liu C. *Bacillus velezensis* CCO9: a potential “vaccine” for controlling wheat diseases // Published online. 2018. V. 31. No. 6. P. 623–632. doi: 10.1094/MPMI-09-17-0227-R
26. Melentiev A.I., Helisto P., Kuzmina L.Yu., Galimzyanova N.F., Aktuganov G.E., Korpela T. Application of antagonist bacilli for biocontrol of fungi that destroy raw wood // Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya. 2006. V. 42. No. 1. P. 70–75 (in Russian).
27. Sidorova T.M., Asaturova A.M., Khomyak A.I. Biologically active metabolites of *Bacillus subtilis* and their role in the control of phytopathogenic microorganisms (review) // Agricultural Biology. 2018. V. 53. No. 1. P. 29–37. doi: 10.15389/agrobiology.2018.1.29eng
28. Stein T. *Bacillus subtilis* antibiotics: structures, syntheses and specific functions. Micro Review // Mol. Microbiol. 2005. V. 56. No. 4. P. 845–857. doi: 10.1111/j.1365-2958.2005.04587.x
29. Wang T., Liang Y., Wu M., Chen Z., Lin J., Yang L. Natural products from *Bacillus subtilis* with antimicrobial properties // Chinese J. Chem. Eng. 2015. V. 23. No. 4. P. 744–754. doi: 10.1016/j.cjche.2014.05.020
30. Sharma A. Rhamnolipid producing PGPR and their role in damping off disease suppression // Plant bacteria interactions strategies and techniques to promote plant growth / Eds. I. Ahmad, J. Pichtel, S. Haya. Wiley VCH Publications, Weinheim, 2008. P. 213–233. doi: 10.1002/9783527621989.ch11
31. Li J., Yang Q., Zhao L., Zhang S., Wang Y., Zhao X. Purification and characterization of a novel antifungal protein from *Bacillus subtilis* strain B29 // J. Zhejiang Univ. Sc. B. 2009. V. 10. No. 4. P. 264–272. doi: 10.1631/jzus.B0820341
32. López D., Vlamakis H., Losick R., Kolter R. Cannibalism enhances biofilm development in *Bacillus subtilis* // Mol. Microbiol. 2009. V. 74. P. 609–618. doi: 10.1111/j.1365-2958.2009.06882.x
33. Novikova I.I., Boikova I.V., Shenin Yu.D. Biological features and component composition of the active complex of the *Streptomyces chrysomallus* P-21 strain, an antagonist of phytopathogenic fungi // Vestnik zashchity rasteniy. 2006. No. 3. P. 13–21 (in Russian).
34. Novikova I.I., Shenin Yu.D., Tsyplenkov A.E., Fominykh T.S., Suika P.V., Boikova I.V. Biological features of peptides and heptaene aromatic macrolides isolated

from *Streptomyces chrysomallus* P-21 and *S. globisporus* L-242 – strains-producers of polyfunctional biologics chryosomal and globerin for protecting plants from diseases of various etiologies // Vestnik zashchity rasteniy. 2009. No. 2. P. 3–19 (in Russian).

35. Novikova I.L., Titova Yu.A., Boikova I.V., Krasnobaeva I.L. Directed selection of the psychrophilic strain *Trichoderma asperellum* G-034 VIZR for accelerated utilization of plant residue polymers and soil improvement // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2019. V. 23. No. 3. P. 328–336 (in Russian). doi: 10.18699/VJ19.497

36. Shcherbakova T. Spectrum of antifungal action of a biological product based on *Trichoderma virens* Miller, Giddens and Foster on pathogens of agricultural crops // Știința agricolă. 2019. No. 1. P. 84–88 (in Russian).

37. Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Starikov P.A., Gornostaeva E.A., Ashikhmina T.Ya. Microbes-antagonists against of phytopathogenic bacteria and fungi (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 6–14 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-006-014

38. Susi P., Aktuganov G., Himanen J., Korpela T. Biological control of wood decay against fungal infection // Journal of Environmental Management. 2011. V. 92. No. 7. P. 1681–1689. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.03.004

39. Ogarkov B.N., Ogarkova G.R., Samusenok L.V., Bukovskaya N.E. Development of mycofungicide for protection against biodamage of industrial materials, products and wood // Modern problems of biology, ecology and soil science. Moskva: Izd-vo IGU, 2019. P. 74–76 (in Russian).

40. Humphris S.N., Wheatley R.E., Bruce A. The effects of specific volatile organic compounds produced by *Trichoderma* spp. on the growth of wood decay basidiomycetes // Wood Science and Technology Holzforschung. 2001. V. 55. No. 3. P. 233–237. doi: 10.1515/HF.2001.038

41. Wheatley R., Hackett C., Bruce A., Kundzewicz A. Effect of substrate composition on production of volatile organic compounds from *Trichoderma* spp. inhibitory to wood decay fungi // International Biodeterioration & Biodegradation. 1997. V. 39. No. 2–3. P. 199–205. doi: 10.1016/S0964-8305(97)00015-2

42. Voda K., Boh B., Vrtačnik M., Pohleven F. Effect of the antifungal activity of oxygenated aromatic essential oil compounds on the white-rot *Trametes versicolor* and the brown-rot *Coniophora puteana* // Int. Biodeter. Biodegr. 2003. V. 51. No. 1. P. 51–59. doi: 10.1016/S0964-8305(02)00075-6

43. Chittenden C., Singh T. Antifungal activity of essential oils against wood degrading fungi and their applications as wood preservatives // Int. Wood Prod. J. 2011. V. 2. No. 1. P. 44–48. doi: 10.1179/2042645311Y.0000000004

44. Xie Y., Wang Z., Huang Q., Zhang D. Antifungal activity of several essential oils and major components against wood-rot fungi // Ind. Crops Prod. 2017. V. 108. No. 1. P. 278–285. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.06.041

45. Salem M.Z.M., Zidan Y.E., Mansour M.M.A., El Hadidi N.M.N., Elgat W.A.A. Antifungal activities of two

essential oils used in the treatment of three commercial woods deteriorated by five common mold fungi // Int. Biodeter. Biodegr. 2016. V. 106. P. 88–96. doi: 10.1016/j.ibiod.2015.10.010

46. Rawat K., Sahoo U.K., Hegde N., Kumar A. Effectiveness of neem (*Azadirachta indica* A. Juss) oil against decay fungi // Sci. Technol. J. 2018. V. 5. No. 1. P. 48–51. doi: 10.22232/stj.2017.05.01.06

47. Broda M. Natural compounds for wood protection against fungi – a review // Molecules. 2020. V. 25. No. 15. Article No. 3538. doi: 10.3390/molecules25153538

48. Anttila A.-K., Pirttilä A.M., Häggman H., Harju A., Venäläinen M., Haapala A., Holmbom B., Julkunen-Tiitto R. Condensed conifer tannins as antifungal agents in liquid culture // Holzforschung. 2013. V. 67. No. 7. P. 825–832. doi: 10.1515/hf-2012-0154

49. Özgenç Ö., Durmaz S., Yıldız Ü.C., Erişir E. A comparison between some wood bark extracts: antifungal activity // Kastamonu Üniv. Orman Fakültesi Dergisi. 2017. V. 17. No. 3. P. 502–508. doi: 10.17475/kastorman.282637

50. Sen S., Tascioglu C., Tirak K. Fixation, leachability, and decay resistance of wood treated with some commercial extracts and wood preservative salts // Int. Biodeter. Biodegr. 2009. V. 63. No. 2. P. 135–141. doi: 10.1016/j.ibiod.2008.07.007

51. Yamaguchi H., Okuda K. Chemically modified tannin and tannin-copper complexes as wood preservatives // Holzforsch. Int. J. Biol. Chem. Phys. Technol. Wood. 1998. V. 52. P. 596–602. doi: 10.1515/hfsg.1998.52.6.596

52. Singh T., Singh A.P. A review on natural products as wood protectant // Wood Sci. Technol. 2012. V. 46. No. 5. P. 851–870. doi: 10.1007/s00226-011-0448-5

53. Sablik P., Giagli K., Pařil P., Baar J., Rademacher P. Impact of extractive chemical compounds from durable wood species on fungal decay after impregnation of non-durable wood species // Eur. J. Wood Wood Prod. 2016. V. 74. No. 2. P. 231–236. doi: 10.1007/s00107-015-0984-z

54. Brocco V.F., Paes J.B., Costa L.G., Brazolin S., Arantes M.D.C. Potential of teak heartwood extracts as a natural wood preservative // J. Clean. Prod. 2017. V. 142. No. 4. P. 2093–2099. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.074

55. Anda R.R., Koch G., Richter H.-G., Talavera F.J.F., Guzmán J.A.S., Satyanarayana K.G. Formation of heartwood, chemical composition of extractives and natural durability of plantation-grown teak wood from Mexico // Holzforschung. 2019. V. 73. No. 6. P. 547–557. doi: 10.1515/hf-2018-0109

56. Füchtner S., Brock-Nannestad T., Smeds A., Fredriksson M., Pilgård A., Thygesen L.G. Hydrophobic and hydrophilic extractives in norway spruce and kurile larch and their role in brown-rot degradation // Front. Plant Sci. 2020. V. 11. Article No. 855. doi: 10.3389/fpls.2020.00855

57. Li Q., Wang X.-X., Lin J.-G., Liu J., Jiang M.-S., Chu L.-X. Chemical composition and antifungal activity of extracts from the xylem of *Cinnamomum camphora* // BioResources. 2014. V. 9. No. 2. P. 2560–2571.

58. Maoz M., Karchesy J.J., Morrell J.J. Ability of natural extracts to limit mold growth on Douglas-fir sapwood // *BioResources*. 2012. V. 7. No. 4. P. 5415–5421. doi: 10.15376/biores.7.4.5415-5421
59. Fernández-Costas C., Palanti S., Charpentier J.-P., Sanromán M.Á., Moldes D. A sustainable treatment for wood preservation: Enzymatic grafting of wood extractives // *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2017. V. 5. No. 9. P. 7557–7567. doi: 10.1021/acssuschemeng.7b00714
60. Arora D.S., Ohlan D. *In vitro* studies on antifungal activity of tea (*Camellia sinensis*) and coffee (*Coffea arabica*) against wood-rotting fungi // *J. Basic Microbiol.* 1997. V. 37. No. 3. P. 159–165. doi: 10.1002/jobm.3620370302
61. Wang Y.-C., Qian W.-J., Li N.-N., Hao X.-Y., Wang L., Xiao B., Wang X.-C., Yang Y.-J. Metabolic changes of caffeine in tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) as defense response to *Colletotrichum fructicola* // *J. Agric. Food Chem.* 2016. V. 64. No. 35. P. 6685–6693. doi: 10.1021/acs.jafc.6b02044
62. Barbero-López A., Monzó-Beltrán J., Virjamo V., Akkanen J., Haapala A. Revalorization of coffee silverskin as a potential feedstock for antifungal chemicals in wood preservation // *Int. Biodeter. Biodegr.* 2020. V. 152. Article No. 105011. doi: 10.1016/j.ibiod.2020.105011
63. Broda M., Mazela B., Frankowski M. Durability of wood treated with aatmos and caffeine-towards the long-term carbon storage // *Maderas-Cienc. Tecnol.* 2018. V. 20. No. 3. P. 455–468. doi: 10.4067/S0718-221X2018005031501
64. Goktas O., Mammadov R., Duru M.E., Ozen E., Colak A.M. Application of extracts from the poisonous plant, *Nerium oleander* L., as a wood preservative // *Afr. J. Biotechnol.* 2007. V. 6. No. 17. P. 2000–2003.
65. Yildiz Ü.C., Kiliç C., Gürgen A., Yildiz S. Possibility of using lichen and mistletoe extracts as potential natural wood preservative // *Maderas-Cienc. Tecnol.* 2020. V. 22. No. 2. P. 179–188. doi: 10.4067/S0718-221X2020005000204
66. Al-Huqail A.A., Behiry S.I., Salem M.Z.M., Ali H.M., Siddiqui M.H., Salem A.Z. Antifungal, antibacterial, and antioxidant activities of *Acacia saligna* (Labill.) HL Wendl. flower extract: HPLC analysis of phenolic and flavonoid compounds // *Molecules*. 2019. V. 24. No. 4. Article No. 700. doi: 10.3390/molecules24040700
67. EL-Hefny M., Salem M.Z.M., Behiry S.I., Ali H.M. The potential antibacterial and antifungal activities of wood treated with *Withania somnifera* fruit extract, and the phenolic, caffeine, and flavonoid composition of the extract according to HPLC // *Processes*. 2020. V. 8. No. 1. Article No. 113. doi: 10.3390/pr8010113
68. Bankova V.S., de Castro S.L., Marcucci M.C. Propolis: Recent advances in chemistry and plant origin // *Apidologie*. 2000. V. 31. No. 1. P. 3–15. doi: 10.1051/apido:2000102
69. Quiroga E.N., Sampietro D.A., Soberón J.R., Sgariglia M.A., Vattuone M.A. Propolis from the northwest of Argentina as a source of antifungal principles // *J. Appl. Microbiol.* 2006. V. 101. No. 1. P. 103–110. doi: 10.1111/j.1365-2672.2006.02904.x
70. Xu X., Pu R., Li Y., Wu Z., Li C., Miao X., Yang W. Chemical compositions of propolis from China and the united states and their antimicrobial activities against *Penicillium notatum* // *Molecules*. 2019. V. 24. No. 19. Article No. 3576. doi: 10.3390/molecules24193576
71. Akçay Ç., Birinci E., Birinci C., Kolaylı S. Durability of wood treated with propolis // *BioResources*. 2020. V. 15. No. 1. P. 1547–1562.
72. Casado-Sanz M.M., Silva-Castro I., Ponce-Herrero L., Martín-Ramos P., Martín-Gil J., Acuña-Rello L. White-rot fungi control on *Populus* spp. Wood by pressure treatments with silver nanoparticles, chitosan oligomers and propolis // *Forests*. 2019. V. 10. No. 10. Article No. 885. doi: 10.3390/f10100885
73. Jones D., Howard N., Suttie E. The potential of propolis and other naturally occurring products for preventing biological decay // *Proceedings of the 42nd Annual Meeting of the International Research Group on Wood Protection, Queenstown, New Zealand, 8–12 May 2011. IRG Secretariat: Stockholm, Sweden, 2011. Article No. IRG-WP 11-30575.*
74. Kobayashi T., Furukawa I. Wood-preserving effectiveness of chitosan-metal salts against wood decaying fungi // *J. Anti Bact. Antifung. Agents*. 1995. V. 23. P. 343–348.
75. Furukawa I., Yamamoto S. Improvement of wood quality with chitin and chitosan. (II). Assessment of the fungicidal effect of chitosan-treated wood on wood decaying fungi and microorganisms in the soil // *Res. Bull. Tottori Univ. For.* 1990. No. 19. P. 49–58.
76. Eikenes M., Alfredsen G., Christensen B.E., Militz H., Solheim H. Comparison of chitosans with different molecular weights as possible wood preservatives // *J. Wood Sci.* 2005. V. 51. P. 387–394. doi: 10.1007/s10086-004-0659-6
77. Mazanik N.V. Experience in the use of chitosan to protect wood from fungal damage // *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopolzovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov*. 2019. No. 1 (216). P. 158–162 (in Russian).
78. Larnøy E., Dantz S., Eikenes M., Militz H. Screening of properties of modified chitosan-treated wood // *Wood Mater. Sci. Eng.* 2006. V. 2. P. 59–68. doi: 10.1080/17480270600861118
79. El-Gamal R., Nikolaivits E., Zervakis G.I., Abdel-Maksoud G., Topakas E., Christakopoulos P. The use of chitosan in protecting wooden artifacts from damage by mold fungi // *Electron. J. Biotechnol.* 2016. V. 24. P. 70–78. doi: 10.1016/j.ejbt.2016.10.006
80. Chittenden C., Singh T. *In vitro* evaluation of combination of *Trichoderma harzianum* and chitosan for the control of sapstain fungi // *Biological Control*. 2009. V. 50. No. 3. P. 262–266. doi: 10.1016/j.biocontrol.2009.04.015