

С. В. Жила^{1✉}, Е. А. Тюткова¹, И. В. Фуряев¹

Перспективы лесоправления в нарушенных темнохвойных насаждениях Сибири

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация
e-mail: getgain@mail.ru

Аннотация. В последние десятилетия темнохвойные леса Сибири подвергаются масштабной деградации из-за инвазии уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford). Этот агрессивныйксилофаг, ранее не характерный для сибирских экосистем, стал ключевым фактором ослабления пихтовых насаждений в Красноярском крае. В сочетании с климатическими изменениями (рост температур, засухи) это привело к катастрофической гибели лесов в южных и центральных районах Сибири. Сохранение темнохвойных лесов Сибири требует комплексного подхода, сочетающего в себе мониторинг и прогнозирование за состоянием древостоев в нарушенных насаждениях, санитарные и лесовосстановительные меры, биологические методы борьбы с вредителями и долгосрочную адаптацию лесного хозяйства к климатическим изменениям. Также важным направлением является не только адаптация нормативной базы, но и разработки научно-обоснованных подходов переработки сухостойной древесины. В данной работе приведены современные стратегии лесоправления в условиях массового усыхания темнохвойных древостоев.

Ключевые слова: нарушенные пихтовые насаждения, изменения климата, инвазия полиграфа уссурийского, пожарная опасность темнохвойных насаждений, отпад древесины, лесоправление, основные полимерные компоненты

S. V. Zhila^{1✉}, E. A. Tyutkova¹, I. V. Furyaev¹

Prospects for forest management in disturbed dark coniferous forests of Siberia

¹V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation
e-mail: getgain@mail.ru

Abstract. In recent decades, dark coniferous forests of Siberia have been subject to large-scale degradation due to the invasion of four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford). This aggressive xylophage, previously uncharacteristic of Siberian ecosystems, has become a key factor in the weakening of fir stands in the Krasnoyarsk Territory. In combination with climate change (rising temperatures, droughts), this has led to catastrophic forest loss in the southern and central regions of Siberia. Preservation of dark coniferous forests of Siberia requires a comprehensive approach that combines monitoring and forecasting the condition of stands in disturbed stands, sanitary and forest restoration measures, biological methods of pest control and long-term adaptation of forestry to climate change. Another important area is not only the adaptation of the regulatory framework, but also the development of scientifically based approaches to the processing of dead wood. This paper presents modern forest management strategies in the context of massive drying out of dark coniferous stands.

Keywords: damaged fir stands, climate change, invasion of four-eyed fir bark beetle, fire hazard of dark coniferous stands, timber loss, forest management, main polymer components

Введение

Бореальные лесные экосистемы Сибири представляют собой важнейший компонент глобальной климатической системы, выполняя функцию существенного стока атмосферного углерода [1]. Согласно современным исследованиям [1,2], их углерододепонирующая способность оказывает компенсаторное воздействие на углеродный баланс, нивелируя часть эмиссий, генерируемых тропическими лесными массивами и североамериканскими бореальными лесами. В условиях антропогенных климатических изменений поддержание экосистемных функций российских бореальных лесов становится стратегически важной задачей для обеспечения глобальной экологической устойчивости и стабилизации климатической системы. Темнохвойные лесные экосистемы на обширных территориях Сибири ежегодно испытывают комплексное негативное воздействие биотических и абиотических факторов, таких как, массовые размножения насекомых-ксилофагов, распространение фитопатогенов, пирогенную нагрузку, все эти факторы неминуемо ведут к трансформации лесорастительных условий [3,4]. Указанные изменения обуславливают устойчивую тенденцию к сокращению площадей коренных темнохвойных насаждений, что актуализирует необходимость разработки научно обоснованных подходов к адаптивному управлению лесными ресурсами.

Масштабное усыхание темнохвойных лесов, вызванное инвазией уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford), наблюдается на территории Сибири уже свыше десятилетия [5,6]. Экспансия данного фитофага существенно интенсифицировалась вследствие учащения экстремальных засушливых периодов, зарегистрированных в последние десятилетия, что привело к значительному снижению резистентности темнохвойных древостоев [7].

Согласно современным прогнозам, ожидается дальнейшая экспансия вторичного ареала уссурийского полиграфа с образованием новых очагов инвазии. На текущий момент наблюдается полная колонизация вредителем территории от южных до восточных и западных границ региона, охватывающей все равнинные и предгорные лесные массивы с участием пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.). Особую тревогу вызывает активная экспансия вида в северном направлении [8,9].

Массовое усыхание и гибель темнохвойных древостоев в нарушенных насаждениях, неизбежно приводит к трансформации лесного полога, насаждения утрачивают свои важнейшие экологические функции: водоохранную, средообразующую и углерододепонирующую [10].

Массовый отпад деревьев в нарушенных темнохвойных насаждениях способствует увеличению запасов горючих материалов. Меняющиеся вследствие инвазии вредителя лесорастительные условия, приводят к увеличению запаса крупнотравных видов и как следствии большей пожароопасности. Запас живого напочвенного покрова в нарушенных насаждениях увеличился более чем в два раза по сравнению ненарушенными [11,12].

Современные экологические и экономические условия диктуют необходимость разработки научно обоснованных подходов к утилизации и дальнейшего применения сухостойной древесины в деградированных лесных массивах. Как показывают исследования [13,14] данный ресурс обладает значительным потен-

циалом для многоцелевого использования при условии соблюдения экологических и технологических требований.

Исходя из вышесказанного, необходимо всесторонне изучить степень деградации нарушенных темнохвойных насаждений, а также их дальнейшую трансформацию. Важной задачей, с точки зрения эффективного лесопользования является реализация потенциала сухостойной древесины, путем её переработки в продукцию с высокой добавленной стоимостью.

Методы и материалы

Для оценки нарушенности и перспектив восстановления, поврежденных уссурийским полиграфом насаждений нами, было заложено четыре пробные площади (ПП) с разной степенью деградации древесного полога. Изучаемые пробные площади разделены по степени давности воздействия короеда. На ПП1 и ПП2, расположенных в Мининском лесничестве (55°99'с.ш. и 92°06'в.д.), было зафиксировано значительное усыхание древесного полога (до 80 %). На ПП3 и ПП4, расположенных в Емельяновском лесничестве (56°13'с.ш. и 91°59'в.д.), усыхание пихты составило 45-50 %.

Район исследований относится к Среднесибирской равнине, расположен в ее южно-таежной части, на стыке с горной системой Восточного Саяна. Район входит в территорию водораздела бассейнов рек Оби и Енисея, для которого характерно наличие обширных плоскогорий, а также плоских водораздельных гор, высотой до 877 м. Климат района умеренно-континентальный, с холодной длинной, зимой и жарким, коротким летом. Для района характерно достаточное и даже избыточное количество осадков. Почвы подзолистые, имеют развитый гумусовый горизонт, выраженную кислую реакцию.

Темнохвойные насаждения с преобладанием пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) относятся к крупнотравно-зеленомошному типу леса. Древостои одноярусные, с хорошо развитым подлеском из спиреи (*Spiraea salicifolia* L.), рябины (*Sorbus aucuparia* L.) и малины лесной (*Rubus idaeus* L.). Средний возраст древостоев составляет 120-130 лет. Древостои в насаждениях относятся к III классу бонитета, средний диаметр варьирует от 18 до 22 мм, средняя высота от 20 до 25 м, полнота 0,5-0,7.

Для определения жизненного состояния нарушенных насаждений, в следствии инвазии полиграфа уссурийского, на пробных площадях проведено обследование насаждений в соответствии с общепринятыми таксационными методиками. На каждой пробной площади закладывались 50-ти метровые трансекты, на которых проводились работы по учету отпада деревьев, после вспышки уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford).

В ходе проведенной работы были взяты керны из деревьев пихты погибшей в результате воздействия короеда. После подготовки образцов проводились дендрохронологические исследования, с применением современного оборудования, для определения возраста гибели деревьев на пробных площадях с применением перекрестной датировки.

Для изучения перспектив дальнейшей переработки мертвой древесины производили оценку содержания в ней основных полимерных компонентов, с применением метода термического анализа (термогравиметрия (ТГ)). Для этого брались

образцы древесины (сквозные керны) на высоте 1,3 м у четырех групп деревьев. Первая группа – контрольные насаждения пихты сибирской (5 шт.) (контрольная площадь – ТГ0), вторая группа – насаждения пихты сибирской давности гибели 5 лет (5 шт.) (ТГ5), третья группа – насаждения пихты сибирской давностью гибели 10 лет (5 шт.) (ТГ10), четвертая группа – насаждения пихты сибирской давностью гибели 20 лет (5 шт.) (ТГ20). Образцы аккуратно измельчали в древесную пыль, кондиционировали в течении трех недель при относительной влажности воздуха ~ 65 %, затем измеряли с использованием метода термического анализа.

Результаты

В ходе исследования жизненного состояния темнохвойных насаждений с доминированием пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.), подвергшихся воздействию уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford), проводилась комплексная оценка, учитывались такие параметры как, степень деградации древостоев, экологические последствия инвазии, а также временная динамика повреждений.

Анализ полученных данных выявил выраженную корреляцию между такими параметрами как интенсивностью патологических изменений, продолжительностью воздействия инвазионного вида и глубиной экологических последствий.

На пробных площадях ПП3 и ПП4, где первые признаки инвазии *P. proximus* были зарегистрированы приблизительно 10 лет назад, наблюдались начальные стадии деградации. В то время как площадях ПП1 и ПП2, испытывающей воздействие массовой популяции вредителя в течение уже 20 лет, зафиксированы катастрофические нарушения лесной экосистемы.

Проведенные исследования на пробных площадях выявили выраженную негативную динамику состояния древостоев, коррелирующую со степенью их нарушенности. Выявлено существенное сокращение доли витальных особей пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) под воздействием ксилофага, с учетом давности инвазии наблюдается прогрессирующее увеличение доли ослабленных деревьев (на 25–40 %), деревьев в стадии усыхания (на 15–30 %), а также сухостойных стволов (до 35 % от общего состава). Ослабленные деревья характеризовались: заметно изреженной кроной, потерявшей цвет хвоей, сложно определяемым приростом текущего года, очень часто, у таких деревьев, были выявлены признаки сувершинности.

Массовая деградация и гибель древостоев в нарушенных лесных экосистемах, закономерно вызывает структурно-функциональную трансформацию лесного полога. Данный процесс сопровождается критическим снижением ключевых экосистемных функций.

Изучения содержания основных полимерных компонентов в древесине погибших деревьев проводили методом термического анализа. Данный метод рассматривается в настоящее время как комплексный и чувствительный метод быстрого обнаружения молекулярных различий (изменений) в древесине, пораженной грибными инфекциями [15], что крайне важно для оценки эффективного лесопользования и осуществления грамотной хозяйственной деятельности в нарушенных насаждениях.

Представленный аналитический метод получил широкое распространение в исследованиях физических характеристик древесного субстрата, обеспечивая

комплексную оценку межмолекулярных взаимодействий между основными структурными компонентами [16].

Образцы древесины пихты различались по содержанию гемицеллюлоз. Из рис. 1 видно, что с увеличением давности гибели насаждения снижается содержание гемицеллюлоз в клеточных стенках древесины пихты.

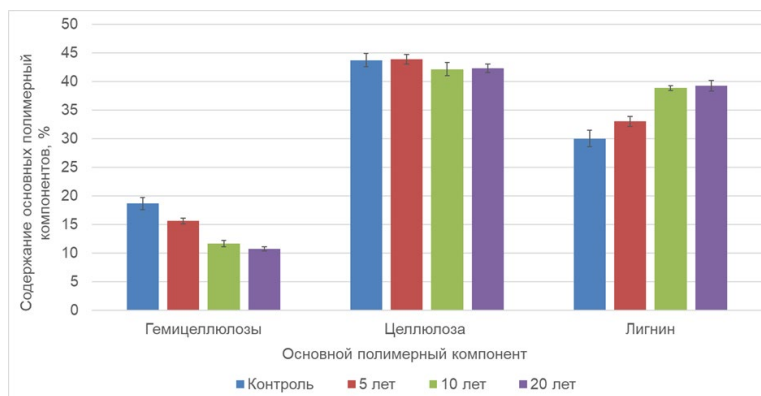


Рис. 1. Распределение основных полимерных компонентов в древесине в зависимости от давности гибели древостоев

В образцах ТГ20 содержание гемицеллюлоз уменьшилось на 72 % по сравнению с таковыми из ТГ0. Полученные данные дают нам право предполагать, что в образцах из ТГ5-ТГ20 может развиваться бурая гниль [17]. Грибы бурой гнили разрушают гемицеллюлозу и целлюлозу, которые формируют структуру древесины. Целлюлоза разрушается перекисью водорода (H_2O_2), которая образуется при распаде гемицеллюлозы. В результате этого типа гниения древесина сжимается, приобретает коричневую. Кроме того, было обнаружено постепенное увеличение содержания лигнина в образцах древесины пихты из ТГ5-ТГ20. Установлено, что древесина пихты из ТГ10 и ТГ20 содержит на 30 % лигнина в клеточных стенках по отношению к ТГ0. Лигнин – это биополимер, который соединяется с целлюлозой, образуя лигноцеллюлозный комплекс, который придает прочность и долговечность клеточным стенкам растений. Из-за своей высокой стабильности лигнин не может быть разрушен путем простого разложения. Повышение содержания лигнина в клеточных стенках образцов пихты из насаждений, нарушенных полиграфом уссурийским может быть объяснено сложным процессом разрывов связей в лигноуглеводной матрице между гемицеллюлозами и лигнином в процессе грибковой атаки.

Обсуждение

В условиях современных реалий, разработка и применение рационального использования сухостойной древесины в нарушенных темнохвойных насаждениях приобретает особую актуальность. Данный ресурс обладает значительным потенциалом для многоцелевого применения. Для успешного решения данной проблемы необходимо всестороннее изучение процессов деградации темнохвойных насаждений и их последующей трансформации. Научное обоснование использования сухостойной древесины должно включать комплексный анализ ди-

намики деградиационных процессов, оценку временных параметров трансформации древесного вещества и детальное изучение биохимических изменений в поврежденных древостоях.

С точки зрения эффективного лесоуправления, особую роль представляет реализация ресурсного потенциала сухостойной древесины путем ее переработки в продукцию с высокой добавленной стоимостью.

Перспективным направлением является разработка программ утилизации, учитывающих специфику лесного фонда определенного лесного района, наличие перерабатывающей инфраструктуры и рыночный спрос на продукцию. Только сочетание всех этих условий позволит создать комплексную систему управления ресурсами сухостойной древесины.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку и интегрированных решений, позволяющих максимально реализовать потенциал сухостойной древесины как важного ресурса для устойчивого развития лесного хозяйства в условиях меняющейся среды.

Заключение

Метод термогравиметрии показал свою эффективность при изучении изменения основных полимерных компонентов в древесине пихты, при поражении ее полиграфом уссурийским и в следствии поражения грибковой инфекцией.

Выявлен тренд на истощение гемицеллюлоз и целлюлозной компонент в образцах пихты сибирской при увеличении срока давности гибели насаждения.

Установлено, что содержание лигнина увеличивается в образцах древесины пихты из насаждений, погибших 10 и 20 лет назад. По-нашему мнению, грибы бурой гнили, разлагающие древесину, в первую очередь нацелены на углеводы, оставляя лигнин модифицированным и потенциально ценным для валоризации. Полученные данные позволят более точно и рационально планировать и осуществлять лесохозяйственную деятельность в нарушенных насаждениях.

Перспективным направлением для осуществления эффективной лесохозяйственной деятельностью является разработка, на основе полученных данных, научно обоснованных технологий утилизации сухостойной древесины, аккумулирующейся в нарушенных насаждениях. Решение этой комплексной задачи требует не только разработки прогностических моделей изменения физико-механических свойств древесины в зависимости от временного фактора нарушенности, но и изучения динамики биодеструкционных процессов в погибших древостоях, с учетом создания инновационных технологий переработки деградированной древесины.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Института леса ФИЦ КНЦ СО РАН - FWES-2024-0007.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Schepaschenko, D. Moltchanova, E. Fedorov, S. Karminov, V. Ontikov, P. Santoro, M. See, L. Kositsyn, V. Shvidenko, Romanovskaya A. Russian Forest Sequesters Substantially More Carbon than Previously Reported // Sci. Rep. 2021. 11. 12825.

2. Готье С., Бернье П., Куувилайнен Т., Швиденко А., Щепаченко Д. Бореальные леса и глобальные изменения // Устойчивое лесопользование. 2016. № 2(46). С. 2–7.

3. Voronin V. I., Sofronov A. P., Morozova T. I., Oskolkov V. A., Sukhovol'skii V. G., Kovalev A. V. The landscape-specific occurrence of bacterial diseases in dark-coniferous forests on Khamar-Daban range (Southern Cisbaikalia) // *Geogr. Nat. Resour.* 2019. № 4. P. 56–65.
4. Kharuk, V. I., Im, S. T., Petrov, I. A., Dvinskaya, M. L., Shushpanov A. S., Golyukov A. S. Climate-driven conifer mortality in Siberia // *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2020. 30. P. 543–556.
5. Астапенко С. А., Ягунов М. Н., Голубев Д. В., Сашко Е. В. Оценка воздействия и распространения насекомых-вредителей в лесах Красноярского края на примере полиграфа уссурийского // *Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф., г. Железногорск, 2014 г.* Железногорск: СПСА, 2014. С. 46–51.
6. Баранчиков Ю. Н., Демидко Д. А., Лаптев А. В., Петько В. М. Динамика отмирания деревьев пихты сибирской в очаге уссурийского полиграфа // *Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн.* 2014. Т. 18, № 6. С. 132–138.
7. Кривец С. А., Керчев И. А., Бисирова Э. М., Пац Е. Н., Чернова Н. А., Демидко Д. А., Мухортова Л. В., Пашенова Н. В., Петько В. М., Баранчиков Ю. Н. Механизмы экспансии и роль уссурийского полиграфа в современных сукцессионных процессах сибирской тайги: итоги трехлетних исследований // *Вредители и болезни древесных растений России. VIII Чтения памяти О.А. Катаева: материалы Междунар. конф. (Санкт-Петербург, 18-20 нояб. 2013 г.).* СПб., 2014. С. 41–42.
8. Soldatov V. V., Golubev D. V., Ostroshinskaya E. M., Gninenko Y. I. *Polygraphus proximus* in the Krasnoyarsk territory // *Invasive dendrophilous organisms: challenges and protection operations.* Pushkino: VNIILM. 2019. P. 104–109.
9. Полиграф уссурийский продолжает распространение в Красноярском крае. 25.11.2022. (Электронный документ) // (<https://krasnoyarsk.rcfh.ru/presscenter/novosti/poligraf-ussuriyskiy-prodolzhaet-rasprostranenie-v-krasnoyarskom-krae>). Проверено 12.11.2024.
10. Кривец С. А., Керчев И. А., Бисирова Е. М., Волкова Е. С., Астапенко С. А., Ефременко А. А., Косилов А. Ю., Кудрявцев П. П., Кузнецова Ю. П., Пономарев В. И., Потапкин А. Б., Тараскин Е. Г., Титова В. В., Шилонос А. О., Баранчиков Ю. Н. Обзор современного вторичного ареала уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) на территории Российской Федерации // *Российский журнал биологических инвазий.* 2024. № 1. С. 49–69.
11. Бакшеева Е. О., Головина А. Н., Морозов С. А. Лесовозобновление и пожароопасность пихтовых насаждений, поврежденных полиграфом уссурийским // *Хвойные бореальной зоны.* 2021. т. XXXIX. № 6. С. 443–450.
12. Жила С. В., Фуряев И. В., Ковалева Н. М. Оценка запасов лесных горючих материалов в поврежденных полиграфом уссурийским пихтовых древостоях Красноярского края // *Сибирский лесной журнал.* 2023. № 6. С. 76–84.
13. Barrette J., Thiffault E., Saint-Pierre F., Wetzel S., Duchesne I., Krigstin S. Dynamics of dead tree degradation and shelf-life following natural disturbances: can salvaged trees from boreal forests ‘fuel’ the forestry and bioenergy sectors? // *Forestry: An International Journal of Forest Research.* 2015. № 88(3). P. 275–290.
14. Bowyer J. L., Shmulsky R., Haygreen J. G. *Forest Products and Wood Science // An Introduction.* 4th edn. Iowa State Press. 2007. – P. 576.
15. Slimen A., Barboux R., Mihajlovski A., Moularat S., Leplat J., Bousta F., Di Martino P. High diversity of fungi associated with altered wood materials in the hunting lodge of “La Mulette”, Saint-Germain-en-Laye, France // *Mycol. Prog.* 2020. № 19. P. 139–146.
16. Gupta B. S, Bjorn, Jelle B. P., Tao Gao. Application of ATR-FTIR Spectroscopy to Compare the Cell Materials of Wood Decay Fungi with Wood Mould Fungin // *International Journal of Spectroscopy.* 2015. – P. 7.
17. Wei W., Tongqi Y., Baokai C., Yucheng D. Investigating lignin and hemicellulose in white rot fungus-pretreated wood that affect enzymatic hydrolysis // *Bioresource Technology.* 2013. V. 134. P. 381–385.

© С. В. Жила, Е. А. Тюткова, И. В. Фуряев, 2025