

Природоподобные лесные технологии как фактор снижения техногенных угроз в условиях интенсивного ведения лесного хозяйства

А.В. Мехренцев^{1a}, Э.Ф. Герц^{1b}, Н.Н. Теринов^{2c}, А.Ф. Уразова^{1d}, Ю.В. Ефимов^{1e}

¹ Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

² Ботанический сад Уральского отделения РАН, ул. 8 Марта, 202а, Екатеринбург, Россия

^a mehrentsevav@m.usfeu.ru, ^b gertsef@m.usfeu.ru, ^c terinovnn@m.usfeu.ru,

^d urazovaaf@m.usfeu.ru, ^e efimovyuv@m.usfeu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-2186-0152>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0434-7282>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-2771-2334>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-6672-2431>

Статья поступила 27.09.2024, принята 28.10.2024

Разработка концепции природоподобных технологий в Российской Федерации определяет в отношении лесного комплекса страны и отдельных регионов необходимость обоснования и разработки комплекса природоподобных технологических процессов, обеспечивающих адаптацию различных лесных экосистем к меняющимся климатическим условиям. В границах Уральского лесорастительного региона актуальность этой задачи определяется высоким уровнем антропогенных нагрузок. Природоподобие технологических процессов рассмотрено как дублирование динамики локальных возмущений в процессе жизненного цикла древостоев видами рубок и технологиями, адаптированными к конкретным условиям места произрастания. Предложено рассматривать адаптационные технологические процессы на ландшафтном уровне, уровне сообществ и локальном уровне. Выполнен расчет возможных объемов изъятия древесины рубками ухода слабой интенсивности в высокобонитетных сосновых молодняках, имитирующими внутривидовую конкуренцию. Рассмотрен вариант широкогопосечной технологии с двухстадийной трелевкой древесины. На первом этапе мини-трактор, работающий под пологом древостоя, осуществляет подтрелевку заготовленной древесины к пасечному волоку, на втором этапе выполняется трелевка высокопроизводительными тракторами с использованием сети трелевочных волоков. Предложено для количественной оценки дополнительной чистой биомной продукции в результате выполнения природоподобных лесных технологий разработать углеродный индикатор на основе сквозного углеродного анализа. Сквозной углеродный анализ включает в себя учет углеродного баланса на каждой стадии производственного процесса ведения лесного хозяйства в условиях лесных экосистем, от лесовыращивания до производства готовой продукции. Предлагаемый углеродный индикатор технологического процесса может быть использован как для оценки интенсивности лесопользования, так и для оценки величины депонирования углерода. Сформулированы основные направления исследований, необходимые для перехода к природоподобным технологиям в условиях интенсивного лесопользования.

Ключевые слова: лесная экосистема; имитация естественных возмущений; природоподобные технологии; выборочные рубки; жизненный цикл леса; углеродный баланс.

Nature-like forest technologies as a factor in reducing anthropogenic threats under conditions of intensive forest management

A.V. Mekhrentsev^{1a}, E.F. Hertz^{1b}, N.N. Terinov^{2c}, A.F. Urazova^{1d}, Yu.V. Efimov^{1e}

¹ Ural State Forest Engineering University; 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia

² Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS; 202 a, Vosmogo Marta St., Ekaterinburg, Russia

^a mehrentsevav@m.usfeu.ru, ^b gertsef@m.usfeu.ru, ^c terinovnn@m.usfeu.ru,

^d urazovaaf@m.usfeu.ru, ^e efimovyuv@m.usfeu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-2186-0152>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0434-7282>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-2771-2334>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-6672-2431>

Received 27.09.2024, accepted 28.10.2024

Development of the concept of nature-like technologies in the Russian Federation defines, in relation to the forest complex of the country and individual regions, the need to justify and develop a set of nature-like technological processes that ensure the adaptation of different forest ecosystems to changing climatic conditions. Within the borders of the Ural forest region, the relevance of this task is determined by the high level of anthropogenic pressures. The natural similarity of technological processes is considered as duplication of the dynamics of local perturbations in the process of the life cycle of forest stands by types of cuttings and technologies adapted to specific conditions of the place of growth. It is proposed to consider adaptation technological processes at the landscape, community and local levels. A calculation is made of the possible volumes of wood removal by low-intensity thinning in high quality pine young forests, simulating intraspecific competition. The variant of wide-slash technology with two-stage timber skidding is considered. At the

first stage, a mini-tractor working under the stand canopy performs skidding of harvested timber to the apiary drag, and at the second stage, skidding by high-capacity tractors using a network of skidding drags. It is proposed to develop a carbon indicator based on end-to-end carbon analysis for quantitative assessment of additional net biome production as a result of implementation of nature-like forest technologies. Cross-cutting carbon analysis includes consideration of the carbon balance at each stage of the production process of forestry in forest ecosystems from forest growing to the production of finished products. The proposed carbon indicator of the technological process can be used both to assess the intensity of forest management and to estimate the value of carbon deposition. The main directions of research necessary for the transition to nature-like technologies in the conditions of intensive forest management are formulated.

Keywords: forest ecosystem; natural disturbance emulation; nature-like technologies; selective logging; forest life cycle; carbon balance.

Введение. В целях повышения эффективности технологической независимости и конкурентоспособности России необходимо в ближайшее время разработать план мероприятий, позволяющий обеспечить внедрение в отраслях экономики природоподобных технологий [1–3].

Природоподобные технологии — это технологии, воспроизводящие системы и процессы живой природы в виде технических систем и технологических процессов, интегрированных в естественный природный ресурсооборот. Специфической особенностью данных технологий является сохранение устойчивости окружающей среды и восстановление баланса между биосферой и техносферой, нарушенного деятельностью человека [4; 5]. Суть природоподобных технологий заключается в создании активного лесоуправления, направленного на недопущение нарушения естественных процессов в природных экосистемах путем сохранения биоразнообразия и повышение их устойчивости. Способы ведения лесного хозяйства, характеризующиеся сходной с естественным жизненным циклом лесной экосистемой, являются базой для формирования природоподобных технологий на локальном уровне.

В ряде исследований природоподобные, или адаптивные технологии рассматриваются как механизм реализации климатически оптимизированного способа ведения лесного хозяйства (*Climate Smart Forestry* – CSF) [6]. Эти технологии рассматривают сохранение биоразнообразия на ландшафтном уровне и уровнях сообществ.

Современные системы рубок ориентированы на рациональное использование древесных ресурсов леса при минимальном нанесении ущерба другим его функциям. Они включают в себя сплошные, группово-постепенные, добровольно-выборочные рубки и рубки ухода, обеспечивающие формирование устойчивых древостоев, максимально соответствующих по породному составу условиям места произрастания. Результатом рационального сочетания лесоводственных, технологических и организационных параметров мероприятий должна стать реализация концепции устойчивого лесоуправления на основе сохранения биоразнообразия, улучшающая качественные показатели насаждения [7; 8]. Вместе с тем, доминирует в настоящее время стратегия интенсивного лесопользования, ориентированная на обеспечение сырьем перерабатывающих производств, что приводит к угрозе биоразнообразию [9; 10].

В естественных лесах нарушения вызываются такими факторами, как пожар, ветер, насекомые, грибки, и происходят в различных пространственных масштабах, от гибели отдельных деревьев до гибели групп деревьев, в том числе на значительных площадях. Природные катаклизмы (нарушения) варьируются также по частоте

и степени повреждения компонентов леса. Эти события, происходящие в рамках ландшафтов в течение длительных временных периодов, характеризуют режим возмущений и формируют сукцессионную мозаику лесов различного состава, структуры и возраста [11]. Природоподобные технологии должны обеспечивать свойственные конкретному типу леса оборот и интенсивность рубок, реализовать технологический процесс на основе комплекса машин и оборудования. При этом параметры возмущений необходимо варьировать в достаточно широком диапазоне, с учетом всех особенностей конкретного типа леса, сохранения биоразнообразия, а также их эволюционного потенциала [12; 13]. Внедрение в лесном хозяйстве природоподобных технологий в полной мере можно рассматривать как превентивную стратегическую меру по адаптации лесного хозяйства к меняющимся климатическим условиям.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования является комплекс технологических процессов рубок, обеспечивающих адаптацию различных лесных экосистем к меняющимся климатическим условиям в границах Уральского лесорастительного региона.

При разработке природоподобных технологий лесоуправления необходимо учитывать стратегию, реализуемую в рамках платформы «Биоэнергетика», которая ориентирована на создание технологических решений, обеспечивающих максимально эффективное использование древесных природных ресурсов и при этом сохраняющих устойчивость лесных экосистем [14; 15]. Комплексное использование древесины, замещающей невозобновляемые углеродоемкие энергетические материалы, интенсификация депонирования углерода в лесах и древесной продукции, нивелирующая возрастающую антропогенную нагрузку, должны стать ключевыми индикаторами вклада лесного комплекса в стабилизацию климата.

Леса 10 территориальных образований Уральского региона ежегодно депонируют в составе чистой первичной продукции (NPP) более 270 млн т на площади 106 млн га [16; 17]. Из них более 80 % возвращается в атмосферу в ходе разложения и отпада и 14 % — при экологических катастрофах, т. е. при пожарах, гибели от вредителей и болезней и т. п. Т. е. около 90 % депонированного лесами углерода (углекислого газа) возвращается в атмосферу в соответствии с естественным жизненным циклом лесной экосистемы. Включение природоподобных технологий на этапе формирования чистой биомной продукции (NBP), снижающих негативные последствия климатического и антропогенного характера, позволит получить дополнительную биомную продукцию (addNBP) (рис. 1).

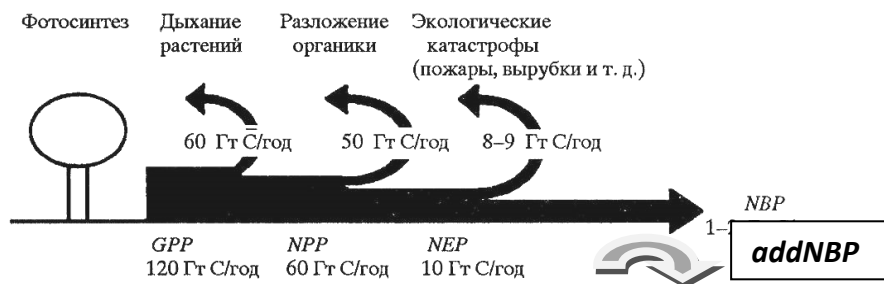


Рис. 1. Соотношение различных категорий глобальной годичной продукции в лесных экосистемах: GPP — общая, или брутто, первичная продукция; NPP — чистая первичная продукция; NEP — чистая экосистемная продукция; NBP — чистая биомная продукция; addNBP — дополнительная чистая биомная продукция

Для выполнения количественной оценки получения дополнительной чистой биомной продукции в результате выполнения природоподобных лесных технологий требуется разработка углеродного индикатора лесных технологий, а также разработка методологии сквозного углеродного анализа в лесном хозяйстве. Данная методика близка известной методике сквозных суммарных расчетов энергоемкости технологического продукта. Одна из таких методик была предложена в 80-х годах прошлого века [18] и получила название методики расчета технологических топливных чисел (ТТЧ). Она имеет ряд существенных особенностей, что позволяет достаточно объективно производить энергетический анализ, или анализ эффективности использования энергии в технологическом процессе [19].

Сквозной углеродный анализ включает в себя учет углеродного баланса на каждой стадии производственного процесса ведения лесного хозяйства в условиях лесных экосистем, от лесовыращивания до производства готовой продукции. Результатом сквозного углеродного анализа является величина углеродного индикатора технологического процесса (УИТП), включающего изменение эмиссии углерода в результате выполнения технологического процесса на данном лесном участке и во всех предшествующих переделах технологического процесса за вычетом депонированного углерода при производстве продукции длительного использования.

Первичная эмиссия углерода ($УИ_1$) происходит в экосистеме на лесном участке, на котором запланировано проведение конкретного технологического процесса. Первичная эмиссия фиксирует углеродный сток с конкретного лесного участка и запас депонированного углерода в биомассе и лесной почве до проведения на данном участке лесохозяйственных мероприятий. Первичная эмиссия углерода показывает начальный природный эколого-сырьевой потенциал данного лесного участка.

Производная карбонизация связана с эмиссией углерода ($УИ_2$) в процессе осуществления операций технологического процесса и с депонированием углерода ($УИД_2$) в древесных полуфабрикатах и изделиях, удаляемых с лесного участка при производстве готовой продукции длительного пользования на конкретном этапе технологического процесса.

Скрытая эмиссия углерода ($УИ_3$) определяется величиной углеродного следа, скрытого в инструментах и машинах, используемых в технологическом процессе.

Скрытая эмиссия углерода не влияет непосредственно на технологический процесс, но может стать важным параметром, характеризующим конкурентоспособность оборудования, применяемого в природоподобных технологиях. Оценка скрытой углеродной эмиссии определяется мониторингом величины карбонового следа комплекса предприятий, производящих инструменты и машины, применяемые в технологических процессах лесного хозяйства.

Общий углеродный индикатор технологического процесса может быть рассчитан по формуле:

$$УИТП = УИ_1 + УИ_2 - УИД_2 + УИ_3$$

Одним из основных инструментов управления величиной индикатора технологического следа является CO_2 — эквивалент, а также аналитический пересчет в углеродные единицы объема древесины, скрытой в древесных полуфабрикатах и продукции длительного использования. Известно, что 1 м^3 древесины содержит приблизительно 0,75 тонны CO_2 -эквивалента. Таким образом, хозяйственное освоение лесов должно обеспечивать их устойчивость на основе максимального природоподобия реализуемых технологических процессов, обеспечивающего их устойчивость. При этом интенсификация процессов лесного хозяйства и лесопользования должна обеспечивать максимальное накопление древесины (CO_2 -эквивалента) на лесных участках и его депонирование в древесных полуфабрикатах и изделиях ($УИД_2$).

Реализация природоподобных технологий в лесопользовании на локальном уровне может стать не только инструментом сохранения биоразнообразия, но и триггером для подключения к расходной части углеродного цикла, уменьшая эмиссию углекислого газа, возвращаемого в атмосферу с получением биоэнергии и древесной продукции, депонирующей углерод на весь период ее использования с последующим возможным рециклингом. При этом решаются сразу две глобальных проблемы — экологическая (сокращение атмосферных загрязнений, выбросов парниковых газов, снижение лесопожарных угроз) и энергетическая (производство современного биотоплива, создание комплекса биопродуктов длительного пользования).

Пример имитации динамики естественных возмущений в процессе реализации природоподобными технологиями [20]. Процесс сукцессии разделен на четыре фазы: возобновление, конкуренция, спелость и перестойный

древостой. Имитация процессов, происходящих в древостоях в ходе естественного развития, воспроизводится технологическими процессами, отражающими как процессы развития древостоя, так и деструктивные процессы, вызванные внешней средой и процессами, происходящими непосредственно в лесной экосистеме (рис. 2).

В процессе естественного развития древостоя постоянным фактором, вызывающим динамические изменения, является внутренняя конкуренция, в результате чего происходит самоизреживание. Динамика этого процесса при отсутствии внешних факторов не приводит к существенному изменению в составе древостоя.

Имитация естественных процессов самоизреживания в молодняках достигается проведением рубок ухода, а в спелых и перестойных древостоях — выборочными рубками. При этом природоподобие рубок ухода в высокоплотных древостоях определяется выборкой той части древостоя, которая не имеет перспектив в ходе внутренней конкуренции. Частота и интенсивность этих рубок и принцип отбора деревьев в рубку могут не только обеспечивать природоподобие процесса формирования древостоя, но и, в зависимости от приоритетов, обеспечи-

вать реализацию целевого лесопользования. Ниже приведен фрагмент таблицы хода роста нормальных сосняков 16 класса бонитета.

Величины отпада, приведенные в таблице, могут служить отправной точкой при расчете величин выборки при периодичности ухода раз в 10 лет. Выход деловой древесины при выборке по низовому методу составит от 81,5 % в 30-летних древостоях до 94,1 % в 60-летних, что позволит депонировать от 28,7 до 48,8 т/га CO₂. В последующие периоды объемы отпада снижаются, но и в 90-летних древостоях заготовка и утилизация потенциального отпада за 10-летний период позволят депонировать, тем не менее, до 33,8 т/га CO₂.

Фактическая реализация технологических принципов природоподобия в современных условиях может быть осуществлена при реализации рубок ухода, выборочных рубок в спелых и перестойных древостоях очень слабой и слабой интенсивности, например, комплексом технологического оборудования с применением базовой машины — мини-трактора и ручных моторных пил [22; 23].

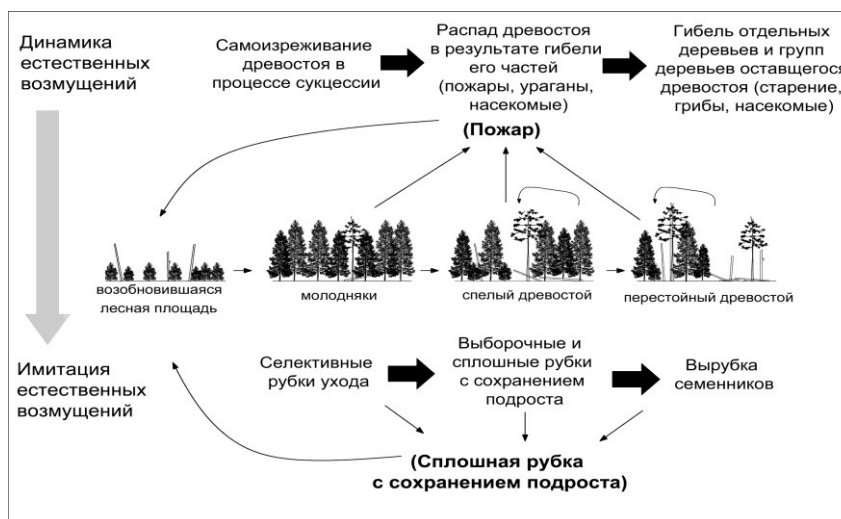


Рис. 2. Иллюстрация моделирования природоподобия лесопользования динамике естественных жизненных циклов древостоев

Таблица. Фрагмент таблиц хода роста нормальных сосняков 16 класса бонитета (по Загрезеву)

Возраст, лет	Древостой до рубки					Отпад		
	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Сумма площадей сечений, см ² /га	Запас, м ³ /га	Число стволов, шт./га	Запас, м ³ /га	Сумма площадей сечений, см ² /га	Число стволов, шт./га
10	5,6	5,6	17,3	64	6 920	6	6	—
20	11,4	10,8	30,3	177	3 293	24	30	3 627
30	16,9	16,2	39,2	307	1 903	47	77	1 390
40	21,6	21,4	46,0	441	1 279	63	140	624
50	25,5	26,4	50,7	562	927	64	204	352
60	28,7	31,0	53,6	658	710	68	272	217
70	31,4	35,0	55,6	738	578	63	336	132
80	33,4	38,5	57,0	800	489	59	394	89
90	35,0	41,8	57,9	845	422	47	453	67

Источник: [21].

При этом применение мини-трактора при транспортировке удаляемой в процессе рубок древесины сохраняет естественную лесную почву для ее дальнейшего устойчивого развития.

Эффект достигается за счет незначительного, в сравнении с используемыми трелевочными тракторами, давления на грунт. Выполнение трелевки заготовленных сортиментов осуществляется в две стадии, на первой стадии мини-трактор подтрелевывает древесину с удаленных частей полупасек к пасечному волоку,

а на второй стадии трелевка осуществляется высокопроизводительными гусеничными тракторами с использованием сети волоков. Значительная ширина пасек, древесина с которых вытрелевывается по одному волоку, позволяет в значительной степени сократить число волоков, а значит, и долю уплотненных и пластически деформированных почв на делянке. Мини-трактор для набора пачки заходит к границе пасеки и, перемещаясь в направлении пасечного волока, загружается (рис. 3).

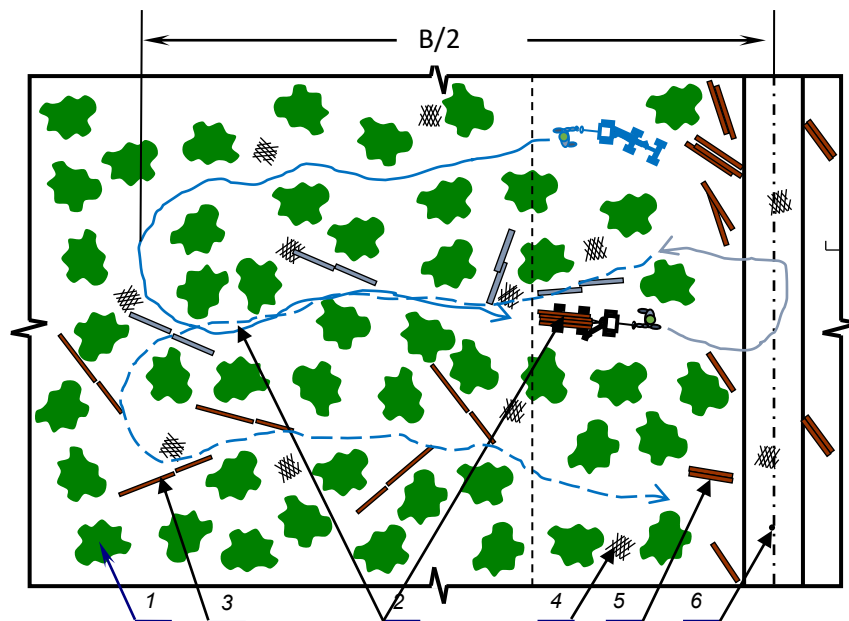


Рис. 3. Работа и маршрут перемещения мини-трактора: 1 — растущие деревья; 2 — мини-трактор и маршрут его перемещения; 3 — заготовленные сортименты; 4 — порубочные остатки; 5 — пачеты сортиментов; 6 — пасечный волок

Катастрофические процессы гибели древостоев при интенсивном ведении лесного хозяйства имитируются группово-постепенными или сплошными рубками. В эксплуатационных лесах проведение рубок спелых и перестойных древостоев с использованием систем тяжелых лесозаготовительных машин в значительной мере нарушает состояние устойчивого равновесия лесной экосистемы. Характерной особенностью современных интенсивных моделей ведения лесного хозяйства является уменьшение площади лесосек и использование мобильных многофункциональных машинных комплексов, оснащенных манипуляторными устройствами. Это обеспечивает наилучшее ландшафтное примыкание в сочетании с наименьшей площадью пространств, подверженных стрессовым краевым эффектам. Природоподобность технологий, свойственных интенсивным моделям ведения лесного хозяйства, достигается путем рационального подбора вида рубок, размеров лесосек и их размещения, а также за счет создания таких коммуникационных компонентов, как экологические и технологические коридоры под пологом леса и сохранение ключевых биотопов. Применение манипуляторных машинных комплексов, легкой малогабаритной техники, канатных систем является приоритетным направлением использования природоподобных технологий в эксплуатационных лесах [24].

В ослабленных и расстроенных древостоях существуют риски отпада отдельных деревьев и групп деревьев в периоды периодической активности вредителей леса. Кроме того, в изреженном и ослабленном древостое возможен вывал деревьев в результате ветров относительно невысокой интенсивности, что приводит к групповой динамике формирования горизонтальной структуры древостоя.

Динамика локальных возмущений в процессе жизненного цикла древостоев может моделироваться добровольно-выборочными рубками, а также равномерно-постепенными и длительно-постепенными рубками различной интенсивности. Эти рубки позволяют на локальном уровне лучшим образом сохранять биоразнообразие. Это возможно, если формировать природоподобные технологии с применением современных машинных комплексов, максимально сохраняющих элементы биоразнообразия лесной экосистемы. В спелых древостоях технологическая увязка режимов ведения лесного хозяйства должна соответствовать естественной природной периодичности лесных пожаров, присущей данному типу леса [25]. Часть лесной территории обновляют посредством проведения обоснованных сплошнолесосечных рубок, в том числе санитарных в поврежденных насаждениях. Таким образом обеспечивается природоподобие динамики лесных экосистем, которые с определенной периодичностью мо-

гут погибать в результате пожаров различной интенсивности, ураганов или массового нашествия вредителей леса. Другая часть насаждений подвергается постепенным рубкам с целью пошагового повышения эффективности процесса формирования устойчивого насаждения. Таким образом, в процессе выполнения технологических приемов имитируются условия формирования лесной экосистемы в результате длительного беспожарного периода. При этом применение мини-трактора при транспортировке удаляемой в процессе рубок древесины сохраняет естественную лесную почву для ее дальнейшего устойчивого развития.

Заключение. Переход на природоподобные лесные технологии в условиях интенсивного лесопользования предполагает максимальное сохранение биоразнообра-

зия при условии обеспечения сырьем лесоперерабатывающих производств.

При этом технологии должны обеспечивать:

– реализацию системы рубок, обеспечивающей максимизацию уровня депонирования углерода как лесными территориями в результате увеличения прироста, так и комплексное использование древесины, замещающей невозобновляемые углеродоемкие энергетические материалы;

– применение углеродного индикатора по всей технологической цепочке, от лесовыращивания до производства высокотехнологичной древесной продукции, для повышения углеродной эффективности производственных процессов лесного комплекса.

Литература

- О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации: указ Президента РФ № 819 от 2 нояб. 2023 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311020021?ysclid=m2u71un27m789423346> (дата обращения: 29.09.2024).
- Антонова Т.С., Чернов М.В., Выродова С.А. Совершенствование подходов к освоению лесов с учетом реализации интенсивной модели использования и воспроизводства лесов // Труды С.-Петерб. науч.-исследовательского ин-та лесного хозяйства. 2022. № 2. С. 70-80.
- Ковальчук М.В., Нарайкин О.С., Яцишина Е.Б. Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы // Вестн. РАН. 2019. Т. 89, № 5. С. 455-465.
- Заболотских В.В., Васильев А.В. Природоподобные технологии в защите окружающей среды // Академический вестн. ЕЛПИТ. 2018. Т. 3, № 1 (3). С. 14-26.
- Кокин А.В., Кокин А.А. Природоподобные технологии и сбалансированное природопользование в условиях современной экономики // Гос. и муниципальное управление. Ученые записки. 2020. № 1. С. 131-136.
- Nabuurs G., Verkerk P. Climate-Smart Forestry: mitigation impacts in tree European regions. Science to policy 6 European Forest Institute. 2018. URL: <https://efi.int/publications-bank/climate-smart-forestry-mitigation-impacts-three-european-regions> (date of access: 30.08.2024).
- Горбунова О.И., Кулагина А.Н. Реализация принципов устойчивого управления лесными ресурсами в РФ в новых реалиях // Реализация Стратегии развития лесного комплекса РФ до 2030 года в новых реалиях: материалы Всерос. науч.-практической конф. (16 дек. 2022 г.). Иркутск: Байкальский гос. ун-т, 2023. С. 62-68.
- Пунцукова С.Д. Формирование стратегии устойчивого управления лесами // Общество: политика, экономика, право. 2020. № 10 (87). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-strategii-ustoychivogo-upravleniya-lesami> (дата обращения: 29.09.2024).
- Huvärinen E., Juslén A., Kemppainen E., Uddström A., Liukko U.M. The 2019 Red List of Finnish Species. Helsinki: Ministry of Environment and Finnish Environment Institute, 2019. 703.
- Kontula T., Raunio A. Threatened Habitat Types in Finland 2018. Red List of Habitats - Results and Basis for Assessment. The Finnish Environment 2/2019. Helsinki: Finnish Environment Institute and Ministry of the Environment, 2018. 254.
- Landres P.B., Morgan P., Swanson F.J. Overview of the use of natural variability concepts in managing ecological systems. Ecol. 1999. Appl. 9. P. 1179-1188.
- Kuuluvainen T., Tahvonen O., Aakala T. Even-aged and uneven-aged forest management in boreal Fennoscandia: a review. 2012. Ambio 41. P. 720-737.
- LaRue E.A., Hardiman B.S., Elliott J.M., Fei S. Structural diversity as a predictor of ecosystem function. Environ. Res. 2019. Lett. 14:114011.
- Технологическая платформа «Биоэнергетика» [Электронный ресурс]. URL: <https://tp-bioenergy.ru/> (дата обращения: 29.09.2024).
- Недбайлов М.С. Биоэнергетика: основные тенденции развития рынка и перспективы для России // Креативная экономика. 2023. Т. 17, № 3. С. 869-882.
- Usoltsev V., Zukow W., Tsepordey I., Chasovskikh V. Forest stand biomass and NPP models sensitive to winter temperature and annual precipitation for Betula spp. in Eurasia. Ecological Questions. 2020. 31. P. 15-23.
- Усольцев В.А. Биоразнообразие и биопродуктивность лесов в контексте климатогенной биогеографии // Экопотенциал. 2019. № 1 (25). С. 48-115.
- Егоричев А.П., Лисиенко В.Г., Розин С.Е., Щелоков Я.М. Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Экономия топлива и энергии. М.: Металлургия, 1990. 149 с.
- Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Розин С.Е., Дружинина О.Г. Методология и информационное обеспечение сквозного энергетического анализа. Екатеринбург: УГТУ, 2001. 98 с.
- Bergeron Y., Leduc A., Harvey B.D., Gauthier S. Natural fire regime: a guide for sustainable management of the Canadian boreal forest. Silva Fenn. 2002. 36. P. 81-95.
- Загреев В.И., Сухих А.З., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалева А.Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов: справ. М.: Колос, 1992. 495 с.
- Уразова А.Ф., Герц Э.Ф. Рациональная организация рубок ухода с использованием бензомоторной пилы и мини-трактора // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 4 (83). С. 82-87.
- Мехренцев А.В., Герц Э.Ф., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф. Обоснование технологических параметров процесса трелевки древесины мини-тракторами при проходных рубках // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2022. № 6. С. 126-138.
- Lindenmayer D.B., Franklin J.F., Fischer J. General management principles and a checklist of strategies to guide forest biodiversity conservation // Biological Conservation. 2006. № 131. P. 433-445.
- Bergeron Y., Gauthier S., Flannigan M., Kafka V. Fire regimes at the transition between mixed wood and coniferous boreal forest in northwestern Quebec // Ecology. 2004. № 85 (7). P. 1916-1932.

References

1. On the development of nature-like technologies in the Russian Federation: ukaz Prezidenta RF № 819 ot 2 noyab. 2023 g. [Elektronnyj resurs]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311020021?ysclid=m2u71un27m789423346> (data obrashcheniya: 29.09.2024).
2. Antonova T.S., Chernov M.V., Vyrodova S.A. Improvement of approaches to forest development taking into account the realization of intensive model of forest use and reproduction // Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2022. № 2. P. 70-80.
3. Koval'chuk M.V., Narajkin O.S., Yacishina E.B. Nature-like technologies: new opportunities and new challenges Bulletin of the Russian Academy of Sciences // Vestn. RAN. 2019. V. 89, № 5. P. 455-465.
4. Zabolotskih V.V., Vasil'ev A.V. Nature-like technologies in environmental protection // Academical bulletin ELPIT. 2018. V. 3, № 1 (3). P. 14-26.
5. Kokin A.V., Kokin A.A. Nature-like technologies and balanced nature management in the conditions of modern economy // State and municipal management. Scholar notes. 2020. № 1. P. 131-136.
6. Nabuurs G., Verkerk P. Climat-Smart Forestry: mitigation impacts in tree European regions. Science to policy 6 European Forest Institute. 2018. URL: <https://efi.int/publications-bank/climate-smart-forestry-mitigation-impacts-three-european-regions> (date of access: 30.08.2024).
7. Gorbunova O.I., Kulagina A.N. Implementation of the principles of sustainable forest management in the Russian Federation in the new realities // Realizaciya Strategii razvitiya lesnogo kompleksa RF do 2030 goda v novyh realiyah: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (16 dek. 2022 g.). Irkutsk: Bajkal'skij gos. un-t, 2023. P. 62-68.
8. Puncukova S.D. Formation of sustainable forest management strategy // Society: Politics, Economics, Law. 2020. № 10 (87).
9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-strategii-ustoychivogo-upravleniya-lesami> (data obrashcheniya: 29.09.2024).
10. Hyvärinen E., Juslén A., Kempainen E., Uddström A., Liukko U.M. The 2019 Red List of Finnish Species. Helsinki: Ministry of Environment and Finnish Environment Institute, 2019. 703.
11. Kontula T., Raunio A. Threatened Habitat Types in Finland 2018. Red List of Habitats - Results and Basis for Assessment. The Finnish Environment 2/2019. Helsinki: Finnish Environment Institute and Ministry of the Environment, 2018. 254.
12. Landres P.B., Morgan P., Swanson F.J. Overview of the use of natural variability concepts in managing ecological systems. Ecol. 1999. Appl. 9. P. 1179-1188.
13. Kuuluvainen T., Tahvonen O., Aakala T. Even-aged and uneven-aged forest management in boreal Fennoscandia: a review. 2012. Ambio 41. P. 720-737.
14. LaRue E.A., Hardiman B.S., Elliott J.M., Fei S. Structural diversity as a predictor of ecosystem function. Environ. Res. 2019. Lett. 14:114011.
15. Bioenergy Technology Platform [Elektronnyj resurs]. URL: <https://tp-bioenergy.ru/> (data obrashcheniya: 29.09.2024).
16. Nedbajlov M.S. Bioenergy: main market development trends and prospects for Russia // Journal of Creative Economy. 2023. V. 17, № 3. P. 869-882.
17. Usoltsev V., Zukow W., Tsepordey I., Chasovskikh V. Forest stand biomass and NPP models sensitive to winter temperature and annual precipitation for Betula spp. in Eurasia. Ecological Questions. 2020. 31. P. 15-23.
18. Usol'cev V.A. Biodiversity and forest bioproductivity in the context of climatic biogeography // Eko-potencial. 2019. № 1 (25). P. 48-115.
19. Egorichev A.P., Lisienko V.G., Rozin S.E., Shchelokov Ya.M. Rational use of fuel and energy resources. Economy of fuel and energy. M.: Metallurgiya, 1990. 149 p.
20. Lisienko V.G., Shchelokov Ya.M., Rozin S.E., Druzhinina O.G. Methodology and information support of through-energy analysis. Ekaterinburg: UGTU, 2001. 98 p.
21. Bergeron Y., Leduc A., Harvey B.D., Gauthier S. Natural fire regime: a guide for sustainable management of the Canadian boreal forest. Silva Fenn. 2002. 36. P. 81-95.
22. Zagreev V.I., Suhih A.Z., Shvidenko A.Z., Gusev N.N., Moshkalev A.G. All-Union norms for forest taxation: reference book. M.: Kolos, 1992. 495 p.
23. Urazova A.F., Gerc E.F. Rational organization of thinning with the use of a chain saw and a mini-tractor // The Woods of Russia and economy in them. 2022. № 4 (83). P. 82-87.
24. Mekhrencev A.V., Gerc E.F., Terinov N.N., Urazova A.F. Justification of the technological parameters of the process of skidding wood by mini-tractors at the passing cuttings // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2022. № 6. P. 126-138.
25. Lindenmayer D.B., Franklin J.F., Fischer J. General management principles and a checklist of strategies to guide forest biodiversity conservation // Biological Conservation. 2006. № 131. P. 433-445.
26. Bergeron Y., Gauthier S., Flannigan M., Kafka V. Fire regimes at the transition between mixed wood and coniferous boreal forest in northwestern Quebec // Ecology. 2004. № 85 (7). P. 1916-1932.