

Научная статья

УДК 630*24

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-38-50

Математическая модель отбора деревьев в однородном насаждении при проведении рубок ухода

Г.Э. Рего¹, канд. техн. наук; *ResearcherID*: [AFX-5848-2022](https://orcid.org/0000-0002-2235-8113),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2235-8113>

О.И. Григорьева², канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

И.В. Григорьев³, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

А.М. Воронова⁴, канд. техн. наук; *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0004-9567-6421>

И.С. Должиков⁴, канд. техн. наук; *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

В.П. Друзьянова⁵, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

¹Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; regogr@yandex.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; grigoreva_o@list.ru

³Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Россия, 677007; silver73@inbox.ru

⁴Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; idolzhikov222@mail.ru

⁵Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, д. 58, ул. Белинского, г. Якутск, Россия, 677000; druzvar@mail.ru

Поступила в редакцию 11.11.23 / Одобрена после рецензирования 04.02.24 / Принята к печати 07.02.24

Аннотация. В настоящее время качественный состав эксплуатационных лесных массивов возраста спелости и подходящих к нему часто является неудовлетворительным. Во многом это связано с отсутствием рубок ухода или их неправильным проведением. Производительность лесосечных работ при рубках ухода мала, получаемая древесина в большинстве случаев оказывается невостребованной. Механизация рубок ухода неудобна с производственной точки зрения и экономически невыгодна. Вместе с тем в Российской Федерации есть примеры внедрения передовых зарубежных практик осуществления рубок ухода машинным способом с использованием харвестера и форвадера. Применение этого способа позволяеткратно повысить производительность. Удельные затраты (р/м³) здесь больше затрат на сплошные рубки спелых и перестойных насаждений, однако зачастую меньше, чем при работе вальщиков леса. Еще больше повысить эффективность работы машинных лесозаготовительных комплексов при проведении рубок ухода возможно за счет автоматизации отбора деревьев в рубку. В основу такого отбора необходимо положить главную задачу данного вида рубок – получение наиболее оптимальных по размерно-качественным признакам насаждений к возрасту их спелости. Это становится возможным при учете конкурентной борьбы древесных растений в насаждении до и после проведения рубок ухода. В статье введена математическая постановка задачи назначения деревьев в рубку в однородном насаждении. Показано, что число вариантов решения растет экспоненциально. Реализован алгоритм, базирую-

щийся на жадном методе, и выполнено экспериментальное сравнение этого метода со случайным результатом, а также с удалением дерева, имеющего самого близкого соседа среди всех деревьев. Апробация алгоритма на экспериментальных данных показала, что он эффективнее двух других.

Ключевые слова: рубки ухода за лесом, отбор деревьев в рубку, математическое моделирование, жадный алгоритм, полный взвешенный граф, критерии оптимизации

Благодарности: Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» и за счет гранта РНФ № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Для цитирования: Рего Г.Э., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Воронова А.М., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Математическая модель отбора деревьев в однородном насаждении при проведении рубок ухода // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 38–50. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-38-50>

Original article

A Mathematical Model of Tree Selection in a Homogeneous Plantation during Improvement Thinning

Grigoriy E. Rego¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AFX-5848-2022](https://orcid.org/0000-0002-2235-8113),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2235-8113>

Olga I. Grigoreva², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Igor V. Grigorev³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Anna M. Voronova⁴, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9567-6421>

Ilya S. Dolzhikov⁴, Candidate of Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

Varvara P. Druzyanova⁵, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

¹Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; regogr@yandex.ru

²Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskii per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; grigoreva_o@list.ru

³Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoe, 3rd km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; silver73@inbox.ru

⁴Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2ya Krasnoarmeyskaya, 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; idolzhikov222@mail.ru

⁵North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk, 677000, Russian Federation; druzvar@mail.ru

Received on November 11, 2023 / Approved after reviewing on February 4, 2024 / Accepted on February 7, 2024

Abstract. Currently, the qualitative composition of merchantable forests of maturity age and approaching it is often unsatisfactory. This is largely due to the lack of improvement thinning or its improper carrying out. The productivity of logging operations during improvement thinning is low, and the resulting timber in most cases turns out to be unclaimed. Mechanization of improvement thinning is inconvenient from a production point of view and economically unprofitable. At the same time, in the Russian Federation there are ex-

amples of the implementation of advanced foreign practices of improvement thinning by machine using a harvester and a forwarder. The use of this method allows for a multiple increase in productivity. The unit costs (rub/m³) in this case are higher than the costs of clear cutting of mature and overmature plantations, but often lower than when felling forests. It is possible to further increase the efficiency of machine logging complexes during improvement thinning operations by automating the selection of trees for logging. The basis for such selection should be the main objective of this type of logging – obtaining the most optimal size and quality characteristics of plantations by the age of their maturity. This becomes possible when taking into account the competition of woody plants in the plantation before and after improvement thinning. The article introduces a mathematical formulation of the problem of assigning trees for logging in a homogeneous plantation. It is shown that the number of possible solutions is growing exponentially. An algorithm based on the greedy method is implemented, and an experimental comparison of this method with a random result, as well as with the removal of a tree with the closest neighbour among all trees, is performed. Testing the algorithm on experimental data has shown that it is more effective than the other two.

Keywords: improvement thinning, selection of trees for logging, mathematical modeling, greedy algorithm, complete weighted graph, optimization criteria

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the scientific school “Innovative Developments in the Field of Logging Industry and Forestry” and at the expense of the Russian Science Foundation grant no. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

For citation: Rego G.E., Grigoreva O.I., Grigorev I.V., Voronova A.M., Dolzhikov I.S., Druzyanova V.P. A Mathematical Model of Tree Selection in a Homogeneous Plantation during Improvement Thinning. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 38–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-38-50>

Введение

Процесс роста и развития древостоя регулируется конкурентными отношениями в популяции. Под конкуренцией подразумевают в т. ч. взаимодействия между организмами. Она может быть внутривидовая и межвидовая, активная и пассивная [11, 17]. В процессе такой борьбы деревья в насаждении разделяются на классы – классы Крафта.

Растения в индивидуальном развитии конкурируют между собой в основном за ресурсы окружающей среды, такие как свет, влага и элементы почвенного питания. Свет всегда присутствует в жизни растений, только в разной степени и может регулироваться в процессе роста насаждения путем изменения его густоты. Плодородие почвы, как правило, относительно постоянно. Лесные почвы в основном бедные и кислые, и количество доступных для использования растениями элементов в них ограничено [6]. Поэтому конкуренция за почвенные ресурсы более напряженная и зависит от площади питания каждого растения [8, 9, 16, 22]. С лесохозяйственной точки зрения необходимо знать механизмы межвидовых и внутривидовых взаимоотношений, динамику их развития. Известно, что внутривидовая конкуренция острее, чем межвидовая. Управление процессом изреживания позволяет сформировать насаждения с заданными характеристиками, такими как состав, полнота, запас, а главное, товарная структура [1–5].

Рубки ухода позволяют заменить естественный отбор искусственным посредством осуществления человеком отбора деревьев в рубку. И здесь важны критерии назначения деревьев в рубку и на доращивание: класс Крафта, санитарное состояние дерева, наличие или отсутствие механических дефектов, принадлежность к целевой древесной породе [18–21]. Обязательно учитывать также расположение деревьев относительно друг друга. Конкурентные отношения между деревьями одного вида, как было сказано выше, зависят от площади питания. Отсюда вытекает несколько вопросов с точки зрения фитоценотического и практического лесоводственного подходов [3, 7, 28]: о влиянии соседних деревьев друг на друга, о механизмах их дифференциации на господствующие и отстающие, о расположении относительно остальных с учетом оптимальности товарной и биологической структуры.

С точки зрения конкурентных отношений оставляемых на доращивание после проведения рубок ухода деревьев наиболее рациональным, при прочих равных условиях, является предусмотрение между ними максимально возможного расстояния.

В настоящее время достаточно распространенная практика в лесном хозяйстве – составление подеревного плана насаждения с указанием координат растущих деревьев и их некоторых характеристик (порода, диаметры), что делается при помощи технологии LIDAR. В зависимости от объемов измерений, требуемой точности и производительности такие данные можно получить посредством лазерного сканирования: наземного, мобильного, воздушного.

При наземном лазерном сканировании (рис. 1, а) оператор сканера движется по визуально намеченным параллельным ходам, расстояние между которыми 10–15 м. Метод напоминает технологию сплошного перечета деревьев на лесосеке, но имеет в 2–3 раза бóльшую производительность – 5–7,5 га за смену, а иногда и до 15 га. При реализации данного метода не требуется постоянный спутниковый GNSS-сигнал. Также это метод позволяет получить максимальную точность. Однако некоторые затруднения могут представлять подрост и подлесок.

При мобильном лазерном сканировании используется мобильная станция, объединяющая лазерный сканер, инерциальную систему и приемник GNSS-сигнала. Станция может перемещаться, например, на небольшом колесном или гусеничном вездеходном средстве, таком как мини-трактор [10]. Способ характеризуется значительно большей производительностью по сравнению с наземным сканированием, но дает меньшую точность (сложно определить диаметр деревьев), а также требует открытого неба для корректного GNSS-позиционирования.

Воздушное лазерное сканирование (рис. 1, б) максимально производительное, но обладает меньшей точностью (кривизна стволов обуславливает ошибку при определении их координат). Также при его реализации следует учитывать нормативные аспекты использования беспилотных летательных аппаратов. Большим достоинством метода является возможность определения объема кроны, что в дальнейшем позволит прогнозировать трудоемкость по очистке лесосеки, а также принимать решение о дальнейшем эффективном применении порубочных остатков [23, 24].



Рис. 1. Подеревная съемка насаждения при помощи технологии LIDAR:
a – наземное сканирование; *б* – воздушное

Fig. 1. The tree-by-tree survey of a plantation using the LIDAR technology:
a – ground scanning; *b* – aerial

Рассмотренные варианты подеревной съемки при помощи технологии LIDAR дают возможность получить данные о координатах деревьев и их характеристиках в уже сформировавшемся насаждении. При создании искусственных насаждений, в т. ч. лесных плантаций, некоторые отечественные и зарубежные лесопользователи устанавливают GPS-метки каждого размещенного на территории сеянца (саженца) с закрытой корневой системой при машинном способе посадки (рис. 2) [13, 26, 29, 30].

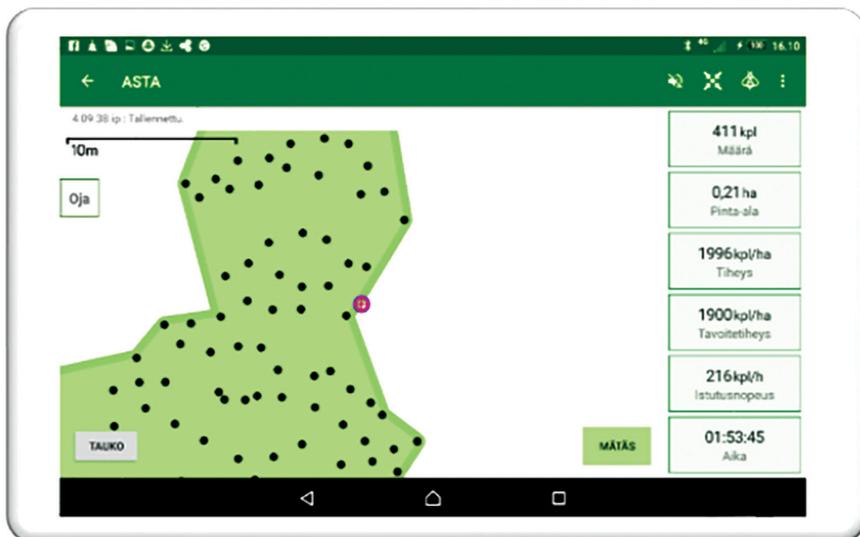


Рис. 2. Схема размещения посадочного материала на мониторе компьютера посадочной машины

Fig. 2. The layout of the planting material on the computer monitor of the planting machine

Практика подеревной лазерной съемки, или получения координатной карты посадки, позволяет достигнуть многих целей цифровизации лесного хозяйства [12, 14, 15], в т. ч. частично автоматизировать процесс отбора деревьев в рубку с заданием и загрузкой в бортовой компьютер лесозаготовительной машины координат выбираемых деревьев. В дальнейшем предполагается использовать программу на современной лесозаготовительной технике. Это существенно повысит эффективность рубок ухода, с точки зрения как достижения оптимума состава древостоя после рубки, так и рентабельности маршрутов движения лесозаготовительной машины и транспортного освоения лесосеки (расположения трелевочных волоков и технологических коридоров).

Для этого необходимо обосновать алгоритмы и разработать модели для расчета оптимального расстояния между деревьями в зависимости от их характеристик, таких как размещение в древостое, диаметр, порода. Зная диаметр дерева, всегда можно вычислить абсолютную полноту насаждения и интенсивность рубки.

Цель данного этапа исследований – математическая постановка задачи, обоснование наилучшего алгоритма отбора деревьев в рубку.

Объектом исследования стали материалы подеревной съемки при помощи технологии LIDAR лесного массива в Республике Татарстан вблизи г. Набережные Челны.

Результаты исследования и их обсуждение

Перейдем к формальной постановке задачи. Будем считать, что лесосека представляет собой замкнутый многоугольник P без дыр. Пусть имеется n деревьев и требуется оставить после выборочной рубки m из них ($m < n$). Деревья смоделируем при помощи кругов, целиком находящихся в многоугольнике P . Круги далее будем называть деревьями. Каждое дерево имеет радиус r_i .

Рассмотрим полный взвешенный граф $G = (V, E)$, где $V = \{v_1, \dots, v_n\}$, вершины $v_i \in V$ соответствуют деревьям, а ребра $e_{ij} \in E$ – парам деревьев v_i и v_j . Полнота графа означает, что все вершины попарно соединены между собой ребрами. Вес w_{ij} ребра e_{ij} равен расстоянию между соответствующими концами ребра деревьями:

$$w_{ij} = d(v_i, v_j) - r_i - r_j,$$

где $d(v_i, v_j)$ – расстояние между центрами кругов, которым соответствуют вершины v_i и v_j ; r_i, r_j – радиусы деревьев i и j .

Требуется выбрать подмножество вершин $V' \subseteq V$, состоящее из m элементов, соответствующих оставленным после выборочной рубки деревьям. Обозначим как $G' = (V', E')$ подграф, порожденный множеством V' , где $E' \subseteq E$ – множество ребер графа G , соединяющих вершины подмножества V' .

Для решения исходной задачи можно использовать различные критерии оптимизации. Мы предлагаем максимизировать сумму весов ребер в подграфе G' :

$$\sum_{e_{ij} \in E'} w_{ij} \rightarrow \max.$$

Это удовлетворяет требованию максимизации суммарного расстояния между центрами оставшихся деревьев.

Всего есть

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$$

вариантов выбора m подмножеств вершин для формирования множества V' , что влечет экспоненциальную сложность решения данной задачи методом полного перебора. Чтобы этого не делать и ускорить процесс решения, предлагается следующий жадный эвристический алгоритм.

Жадный алгоритм для решения задачи поиска индуцированного графа с максимальной суммой весов вершин. Жадные алгоритмы являются популярным методом решения различных задач, в т. ч. на графах, например, для поддержания ориентации ребер динамического графа [25, 27], поиска минимального остовного дерева [31] или расчета схем транспортных маршрутов на вырубке [29]. Опишем алгоритм жадного метода для данной задачи.

В рамках жадного метода можно подсчитать сумму весов ребер всех вершин и удалять на каждом шаге вершину, сумма весов инцидентных ребер которой минимальна.

Пример построения алгоритма выглядит так:

Вход: $G = (V, E)$, $r_i \rightarrow v_i$, $|V'|$.

Выход: V' и $\sum_{w_i \in W_w} w_i$ – множество оставшихся в графе вершин и сумма весов всех ребер графа G соответственно

Begin

1. While $|V'| \neq |V|$ do

2. Инициализировать множество весов $W_E: W_E = |E|$

3. Инициализировать множество $W_V: W_V = |V|$, где каждый элемент

соответствует суммарному весу отдельной вершины $w_i = \sum_{j=1}^{|V|} w_{ij}$, $w_{ij} \in W_E$

4. Удалить из V вершину v' , для которой $w_{v'} = \min(W_V)$, и все инцидентные ей ребра.

End

Жадный алгоритм конечен, т. к. он делает ограниченное число итераций $|V| - |V'|$. Временную сложность алгоритма можно оценить как $O(|V| \cdot |V|)$. Для каждой вершины требуется найти сумму расстояний до всех остальных вершин. Эта операция также имеет временную сложность $O(|V| \cdot |V|)$. Удаление вершины из графа и обновление сумм расстояний занимает $O(|V|)$, потому что нужен не пересчет всех сумм, а только вычитание из каждой расстояний w_i расстояния w_{ij} до удаляемой вершины j .

Апробация работы алгоритма на данных перечетной ведомости. Для проверки эффективности работы алгоритма были использованы данные перечетной ведомости для однородного насаждения в пригороде Набережных Челнов (рис. 3). Под однородным насаждением здесь понимается насаждение, состоящее из одной породы или с примесью другой меньше 10 %. Состав насаждения – 10Лп+Кл, возраст – 30 лет, бонитет – I. Каждое дерево в ведомости представляет собой пару координат (x, y) в метрах в местной системе координат для Набережных Челнов с указанием его диаметра в метрах. Проводилось сравнение удаления дерева с наименьшим общим расстоянием со случайным результатом и с удалением одного дерева из пары самых близких деревьев.

В последнем случае вырубке подлежало дерево с меньшей суммой расстояний до всех остальных деревьев.

| № точки | X, м | Y, м | Порода дерева | Диаметр D, м |
|---------|------------|-------------|---------------|--------------|
| 1 | 482139,554 | 2323853,05 | липа | 0,25 |
| 2 | 482137,96 | 2323857,75 | липа | 0,40 |
| 3 | 482140,336 | 2323857,165 | липа | 0,25 |
| 4 | 482138,238 | 2323861,457 | липа | 0,40 |
| 5 | 482144,11 | 2323854,802 | липа | 0,30 |
| 6 | 482144,424 | 2323857,75 | клен | 0,14 |
| 7 | 482143,52 | 2323860,03 | клен | 0,13 |
| 8 | 482146,198 | 2323861,843 | липа | 0,40 |
| 9 | 482144,815 | 2323870,337 | липа | 0,50 |
| 10 | 482142,006 | 2323868,766 | липа | 0,35 |
| 11 | 482141,191 | 2323868,92 | липа | 0,25 |
| 12 | 482137,513 | 2323873,953 | липа | 0,40 |

Рис. 3. Пример результатов подервной съемки, используемых при моделировании

Fig. 3. An example of tree survey results used in modeling

Выборка содержала 1000 деревьев. На каждой итерации формировалась выборка из 100 случайных деревьев. Выбор любого дерева был равновероятен. Из 100 деревьев одним из описанных способов в 1-й серии экспериментов удалялись 10 и во 2-й – 20 (см. таблицу). Полученный результат (сумма всех попарных расстояний) сохранялся, и производился новый запуск алгоритма. Всего было выполнено 1000 запусков каждой эвристики.

Статистические характеристики результатов экспериментов

The statistical characteristics of the experimental results

| Вид эвристики | Суммарное расстояние между всеми парами вершин | | Среднеквадратичное отклонение суммарного расстояния между всеми парами вершин |
|----------------------------------|--|------------|---|
| | среднее | медианное | |
| <i>При 10 удаляемых деревьях</i> | | | |
| Жадный метод | 314 096,35 | 313 930,03 | 14 395,35 |
| Случайный метод | 297 170,26 | 297 319,13 | 14 673,41 |
| Метод ближайшего соседа | 282 666,67 | 282 469,88 | 14 743,44 |
| <i>При 20 удаляемых деревьях</i> | | | |
| Жадный метод | 261 387,42 | 262 066,41 | 11 441,08 |
| Случайный метод | 234 610,57 | 235 346,60 | 12 284,21 |
| Метод ближайшего соседа | 219 042,78 | 219 132,16 | 12 114,11 |

Жадный метод в среднем показал результат на 5,3, 10,0, 10,0 и 16,0 % лучше случайного метода и метода случайного соседа при 10 удаляемых деревьях и тех же методов при 20 удаляемых деревьях соответственно. Есть основания полагать, что при увеличении числа подлежащих рубке деревьев разрыв между эвристиками будет расти.

Во всех случаях медианное значение отличалось от среднего не более чем на 0,4 %, что говорит о стабильности результатов и отсутствии выбросов.

Диаграмма распределения частот выходных данных для 10 удаляемых деревьев при использовании жадного метода показана на рис. 4. По оси абсцисс откладываются округленные до тысяч суммы попарных расстояний между деревьями по итогам работы одной итерации алгоритма. По оси ординат располагается частота данного результата.

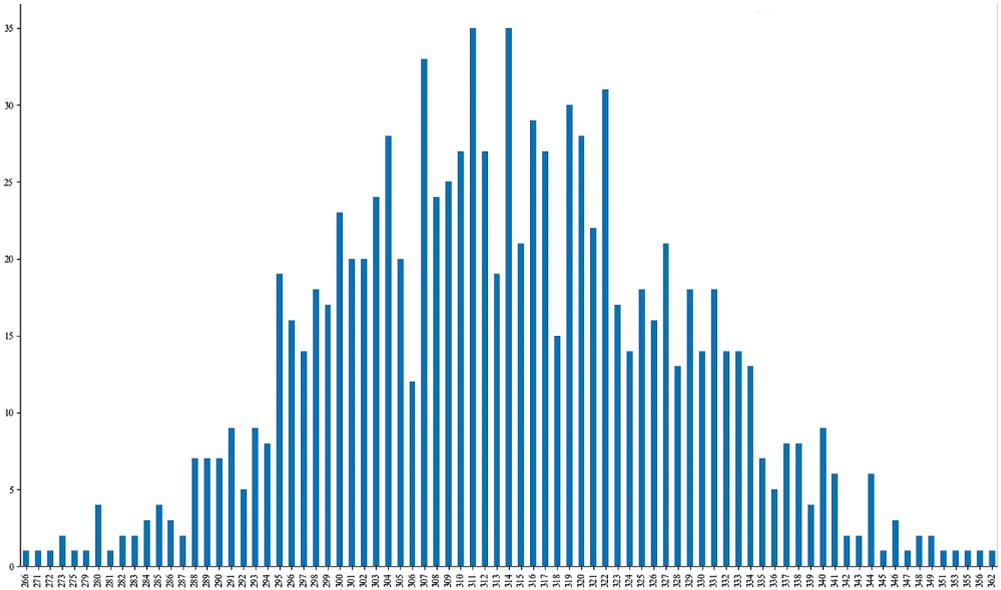


Рис. 4. График частот суммы расстояний между всеми деревьями для жадного метода
Fig. 4. The frequency curve of the sum of distances between all trees for the greedy method

Заключение

Рассмотрена проблема повышения эффективности работы машинных лесозаготовительных комплексов при проведении рубок ухода за лесом путем автоматизации отбора деревьев в рубку. Для автоматизации использована по-деревная съемка при помощи технологии LIDAR или известные координаты каждого дерева насаждения, полученные при его искусственном восстановлении. Назначение деревьев в рубку таким способом позволит оптимизировать размещение сети трелевочных волоков (технологических коридоров) на современном этапе технического развития, а в дальнейшем применять беспилотную технику для проведения рассматриваемого вида работ.

Была введена математическая постановка задачи. При расчете расстояний между деревьями учитывался их радиус. Показано, что число вариантов решения растет экспоненциально. Реализован алгоритм, основанный на жадном методе, и проведено экспериментальное сравнение метода со случайным результатом, а также с удалением дерева, имеющего самого близкого соседа среди всех деревьев. Апробация алгоритма на экспериментальных данных выявила, что жадный метод эффективнее двух других.

Данная задача в такой постановке формулируется впервые. Критерий оптимальности является интегральным и оценивает жизненное пространство деревьев в целом. Решение задачи с использованием обозначенного критерия не позволяет оставить деревья на каком-то небольшом участке, срубив все осталь-

ные. Однако у него есть и недостатки. Теоретически решения, оптимальные по этому критерию, могут содержать небольшие плотные скопления деревьев, значительно удаленные от других. Во избежание такой ситуации следовало бы находить решения, в которых деревья «равномерно» удалены друг от друга, но математически такой критерий формулируется сложнее.

В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть другие критерии оптимальности для данной задачи, такие как максимизация минимального расстояния между парами деревьев, минимизация пересечения зон их влияния друг на друга, а также разделение множества деревьев на кластеры и применение разных критериев для различающихся кластеров. Помимо этого, в текущей постановке задачи не учитывались породы деревьев, хотя, как было сказано выше, межвидовая борьба имеет значительное влияние на прирост деревьев. Этот фактор также планируется учесть в дальнейшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Богачев П.В., Григорьева О.И. Контроль качества и эффективности рубок ухода по нормативам интенсивной модели лесного хозяйства в Тихвинском лесничестве Ленинградской области // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.М. Казакова и др. Казань: Казанск. нац. исслед. технол. ун-т, 2023. С. 16–19.

Bogachev P.V., Grigoreva O.I. Control of the Quality and Efficiency of Logging According to the Standards of the Intensive Forestry Model in the Tikhvin Forestry of the Leningrad Region. *Aktual'nye problemy lesnogo khozyajstva i derevopererabotki: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed. by Yu.M. Kazakov et al. Kazan, Kazan National Research Technological University, 2023, pp. 16–19. (In Russ.).

2. Богачев П.В., Григорьева О.И., Григорьев Г.А. Использование абсолютной полноты как критерия качества проведения рубок ухода // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Девятой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Петрозаводск: Петрозаводск. гос. ун-т, 2023. С. 40–41.

Bogachev P.V., Grigoreva O.I., Grigorev G.A. Using Absolute Density as a Criterion for the quality of Improvement Thinning. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: Materials of the 9th All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation*. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University, 2023, pp. 40–41. (In Russ.).

3. Бузыкин А.И. Устойчивость лесных ценозов в связи с их пространственной структурой и биоразнообразием: НИР: грант № 01-04-48176. Рос. фонд фундамент. исслед., 2001.

Buzykin A.I. *Sustainability of Forest Cenoses in Connection with Their Spatial Structure and Biodiversity*: Research Effort: Grant no. 01-04-48176. The Russian Foundation for Basic Research, 2001. (In Russ.).

4. Григорьева О.И., Панарин А.О. Перспективные пути повышения эффективности рубок ухода в молодняках // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.М. Казакова и др. Казань: Казанск. нац. исслед. технол. ун-т, 2023. С. 70–73.

Grigoreva O.I., Panarin A.O. Promising Ways to Improve the Efficiency of Improvement Thinning in Young Stands. *Aktual'nye problemy lesnogo khozyajstva i derevopererabotki: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed. by Yu.M. Kazakov et al. Kazan, Kazan National Research Technological University, 2023, pp. 70–73. (In Russ.).

5. Григорьева О.И., Панарин А.О. Повышение эффективности ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Девятой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Петрозаводск: Петрозаводск. гос. ун-т, 2023. С. 61–62.

Grigoreva O.I., Panarin A.O. Improving the Efficiency of Forest Management. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa*: Materials of the 9th All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University, 2023, pp. 61–62. (In Russ.).

6. Карпечко А.Ю. Особенности формирования корней в еловых и смешанных насаждениях после рубок ухода в южной Карелии // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2007. № 17. С. 160–163.

Karpechko A.Yu. Features of Root Formation in Spruce and Mixed Stands after Improvement Thinning in South Karelia. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2007, no. 17, pp. 160–163. (In Russ.).

7. Коротюк О.М. Значение и проблемы рубок ухода // Тр. Братск. гос. ун-та. Сер.: Естеств. и инженер. науки – развитию регионов Сибири. 2009. Т. 1. С. 142–147.

Korotyuk O.M. The Importance and Problems of Improvement Thinning. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri* = Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences for the Development of Siberian Regions, 2009, vol. 1, pp. 142–147. (In Russ.).

8. Кузьмичев В.В. Закономерности роста древостоев. Новосибирск: Наука, 1977. 150 с. Kuz'michev V.V. *Patterns of Stand Growth*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 150 p. (In Russ.).

9. Маслаков Е.Л. Формирование сосновых молодняков. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 168 с.

Maslakov E.L. *Formation of Pine Young Stands*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 168 p. (In Russ.).

10. Михайлова Л.М., Куницкая О.А., Мотовилов А.И. Перспективы систем машин на базе средств малой механизации для малообъемных лесозаготовок и лесохозяйственных работ // Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года: сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС(Я) М.Е. Николаева (Николаевские чтения). М.: Знание-М, 2022. С. 735–742.

Mikhailova L.M., Kunitskaya O.A., Motovilov A.I. Prospects for Machine Systems Based on Low-Mechanization Tools for Small-Volume Logging and Forestry Operations. *Strategiya i perspektivy razvitiya agrotekhnologii i lesnogo kompleksa Yakutii do 2050 goda*: Collection of Scientific Articles Based on the Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 100th Anniversary of the Formation of the Yakut ASSR and the 85th Anniversary of the First President of the Republic of Sakha (Yakutia) M. E. Nikolaev (Nikolaev Readings), 2022, pp. 735–742. (In Russ.).

11. Михайлова Н.В., Михайлов А.В. Трехмерная упрощенная модель световой конкуренции деревьев в лесу // Математическое моделирование в экологии: материалы Нац. конф. с междунар. участием. Пушино: ИФХиБПП РАН, 2009. С. 178–179.

Mikhailova N.V., Mikhailov A.V. Three-Dimensional Simplified Model of Light Competition of Trees in a Forest. *Matematicheskoe modelirovanie v ekologii*: Materials of the National Conference with International Participation. Pushchino, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soilscience of the Russian Academy of Sciences, 2009, pp. 178–179. (In Russ.).

12. Морковина С.С. Финансовое обеспечение цифровой трансформации лесного хозяйства РФ // Актуальные вопросы теории и практики финансово-хозяйственной деятельности: сб. материалов II Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. Воронеж: Науч. кн., 2020. С. 109–112.

Morkovina S.S. Financial Support for the Digital Transformation of Forestry in the Russian Federation. *Aktual'nye voprosy teorii i praktiki finansovo-khozyajstvennoj deyatel'nosti*: Collection of Materials of the 2nd All-Russian (National) Scientific and Practical Conference. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2020, pp. 109–112. (In Russ.).

13. Морковина С.С., Панявина Е.А., Авдеева И.А. Исследование системы нормирования в лесном хозяйстве России // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 1(33). С. 176–187.

Morkovina S.S., Panyavina E.A., Avdeeva I.A. Study of the System of Rationing in Forestry of Russia. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2019, vol. 9, no. 1(33), pp. 176–187. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5c9201723dbb21.63764253

14. Морковина С.С., Топчиев А.Н. Цифровизация в лесном секторе: перспективы и потенциал // Современные тенденции развития менеджмента и государственного управления: материалы межрегион. заочн. науч.-практ. конф.: в 2 т. / под ред. А.В. Полянина. Орел: Среднерус. ин-т управления – филиал РАНХиГС, 2019. С. 125–127.

Morkovina S.S., Topcheev A.N. Digitalization in the Forestry Sector: Prospects and Potential. *Sovremennye tendentsii razvitiya menedzhmenta i gosudarstvennogo upravleniya*: Materials of the Interregional Correspondence Scientific and Practical Conference: in 2 vol. Ed. by A.V. Polyinin. Oryol, Central Russian Institute of Management – Branch of The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, 2019, pp. 125–127. (In Russ.).

15. Морковина С.С., Шанин И.И. Применение цифровых технологий в лесном комплексе // Вызовы цифровой экономики: развитие комфортной городской среды: тр. III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Брянск: Брянск. гос. инженер.-технол. ун-т, 2020. С. 553–555.

Morkovina S.S., Shanin I.I. Application of Digital Technologies in the Forestry Complex. *Yzovy tsifrovoj ekonomiki: razvitie komfortnoj gorodskoj sredy*: Proceedings of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, 2020, pp. 553–555. (In Russ.).

16. Рубцов М.В. Структурная трансформация монодоминантных сообществ древостоев в возрастной динамике: НИР: грант № 96-04-49836. Российский фонд фундаментальных исследований, 1996.

Rubtsov M.V. *Structural Transformation of Monodominant Forest Stand Communities in Age Dynamics*: Research Effort: Grant no. 96-04-49836. The Russian Foundation for Basic Research, 1996. (In Russ.).

17. Секретенко О.П., Грабарник П.Я. Анализ горизонтальной структуры древостоев методами случайных точечных полей // Сиб. лесн. журн. 2015. № 3. С. 32–44.

Sekretenko O.P., Grabarnik P.Y. Analysis of Tree Stand Horizontal Structure Using Random Point Field Methods. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2015, no. 3, pp. 32–44. (In Russ.).

18. Сеннов С.Н. Динамика еловых древостоев разного происхождения // Лесоведение. 1992. № 1. С. 3.

Sennov S.N. Dynamics of Spruce Stands of Different Origins. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1992, no. 1, p. 3. (In Russ.).

19. Сеннов С.Н. Итоги экспериментального изучения конкуренции в древостоях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 1993. № 11. С. 160.

Sennov S.N. The Results of an Experimental Study of Competition in Stands. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 1993, no. 11, p. 160. (In Russ.).

20. Сеннов С.Н. Итоги экспериментального изучения взаимоотношений деревьев в смешанных насаждениях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2003. № 170. С. 21–31.

Sennov S.N. The Results of an Experimental Study of Tree Relationships in Mixed Plantations. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2003, no. 170, pp. 21–31. (In Russ.).

21. Сеннов С.Н., Мельников Е.С. Особенности межвидовых взаимоотношений между деревьями // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 1996. № 4. С. 39.

Sennov S.N., Melnikov E.S. Peculiarities of Interspecific Relationships Between Trees. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 1996, no. 4, p. 39. (In Russ.).

22. Терсков И.А., Терскова М.И. О закономерностях процесса изреживания светолимитированных древостоев // Математический анализ компонентов лесных биогеоценозов. Новосибирск: Наука, 1979. С. 25–44.

Terskov I.A., Terskova M.I. On the Regularities of the Thinning Process of Light-Limited Stands. *Mathematical Analysis of the Components of Forest Biogeocenoses*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, pp. 25–44. (In Russ.).

23. Трушевский П.В., Куницкая О.А. Влияние технологии и системы машин лесосечных работ на концентрацию порубочных остатков // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.М. Казакова и др. Казань: Казанск. нац. исслед. технол. ун-т, 2023. С. 110–113.

Trushevskij P.V., Kunitskaya O.A. The Influence of Technology and the System of Forestry Machines on the Concentration of Logging Residues. *Aktual'nye problemy lesnogo khozyajstva i derevoopererabotki: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed. by Yu.M. Kazakov et al. Kazan, Kazan National Research Technological University, 2023, pp. 110–113. (In Russ.).

24. Трушевский П.В., Куницкая О.А. Современные системы машин для очистки лесосек от порубочных остатков // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.М. Казакова и др. Казань: Казанск. нац. исслед. технол. ун-т, 2023. С. 121–126.

Trushevskij P.V., Kunitskaya O.A. Modern Systems of Machines for Clearing Cutting Areas from Logging Residues. *Aktual'nye problemy lesnogo khozyajstva i derevoopererabotki: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed. by Yu.M. Kazakov et al. Kazan, Kazan National Research Technological University, 2023, pp. 121–126. (In Russ.).

25. Berglin E., Brodal G.S. A Simple Greedy Algorithm for Dynamic Graph Orientation. *Algorithmica*, 2020, vol. 82, pp. 245–259. <https://doi.org/10.1007/s00453-018-0528-0>

26. Hertz E., Kunickaya O., Runova E., Tikhonov E., Timokhov R., Mikhaylenko E., Chemshikova Ju., Perfiliev P. Forest Preservation Techniques in the Urals. *International Journal of Environmental Studies*, 2023, vol. 80, iss. 4, pp. 1055–1064. <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2096959>

27. Karp R.M. Reducibility Among Combinatorial Problems. *50 Years of Integer Programming 1958–2008*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2010, pp. 219–241. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68279-0_8

28. Morkovina S.S., Kunickaya O., Dolmatova L., Markov O., Nguyen V.L., Baranova T., Shadrina S., Grin'ko O. Comparative Analysis of Economic Aspects of Growing Seedlings with Closed and Open Root Systems: The Experience of Russia. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2021, vol. 18, iss. 2, pp. 19–26. <https://doi.org/10.3233/AJW210015>

29. Rego G.E., Grigoreva O.I., Voronov R.V. Algorithms for Calculating Schemes of Transport Routes in a Felling Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 806, art. no. 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/806/1/012025>

30. Ryabukhin P., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Makuev V., Sivtseva T., Zdrauskaite N., Hertz E., Markov O. Improving the Efficiency of Forest Companies by Optimizing the Key Indicators of Sustainable Forest Management: a Case Study of the Far East. *Forest Science and Technology*, 2022, vol. 18, iss. 4, pp. 190–200. <https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2128900>

31. Ryan C.T., Smith R.L. A Greedy Algorithm for Finding Maximum Spanning Trees in Infinite Graphs. *Operations Research Letters*, 2022, vol. 50, iss. 6, pp. 655–659. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2022.10.004>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article