

Оптимизация маршрута манипуляторной лесной машины на основе алгоритма имитации отжига

Е.Г. Хитров^{1a}, С.С. Петросян^{2b}, А.Ю. Жук^{3c}, М.А. Кокшаров^{3d}, П.Б. Рябухин^{4e}, М.А. Москаленко^{5f}

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, пер. Институтский, 5У, г. Санкт-Петербург, Россия

³ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, г. Братск, Россия

⁴ Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская 136, Хабаровск, Россия

⁵ Национальный исследовательский университет ИТМО, просп. Кронверкский, 49, г. Санкт-Петербург, Россия

^a hitrov_eg@spbstu.ru ^b surik1622@gmail.com, ^c ftslk@brstu.ru, ^d maksont_koksharov@mail.ru, ^e 000340@togudv.ru, ^f mamoskalenko@itmo.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>

^e <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-7121-7520>

Статья поступила 15.04.2026, принята 15.05.2026

Статья направлена на развитие подхода к планированию назначения деревьев в рубку при реализации природоподобных технологических процессов заготовки на основе методов имитационного моделирования и комбинаторной оптимизации. Используются модельные данные о расположении и объёме деревьев на заданной площади. Сформулирована задача поиска минимума функции штрафов, при решении которой одновременно ищется приближение к оптимальному решению задачи коммивояжера при «подвижных» вершинах-функциях, представляющих собой места технологических стоянок манипуляторной машины, определяемых приближением к решению проблемы максимального разнообразия между деревьями, оставляемыми на доращивание, причём с ограниченными условиями. Представлен алгоритм и программа, реализующие методы комбинаторной оптимизации (алгоритм имитации отжига) и машинного обучения (иерархическая кластеризация). Приведён пример расчёта, в котором модельные деревья распределены на участке 200 × 200 м как случайные величины с равномерным распределением 100 точек. Объёмы стволов в примере также случайные равномерно распределённые величины (суммарный объём 38,89 м³; плановый объём заготовки 0,5 суммарного). В примере оценка минимальной длины маршрута манипуляторной машины между стоянками составила 788,5 м при достижении планового объёма заготовки. На основе представленной программы в дальнейших исследованиях возможны вычислительные эксперименты для определения связей параметров технологического процесса и оборудования, пространственного распределения деревьев и объёмов стволов с целевыми показателями. Результаты дальнейших вычислений будут полезны не только с точки зрения организации производственных процессов, но и позволят дополнить теоретическую базу отрасли знаний, связанную с оценкой экологичности и природоподобности технологии лесопользования.

Ключевые слова: выборочные рубки; природоподобие технологических процессов; агломеративная кластеризация; разнообразие; задача коммивояжера; путь манипуляторной машины.

Route optimization of a forestry manipulator machine based on annealing simulation algorithm

E.G. Khitrov^{1a}, S.S. Petrosyan^{2b}, A.Yu. Zhuk^{3c}, M.A. Koksharov^{3d}, P.B. Ryabukhin^{4e}, M.A. Moskalenko^{5f}

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Forestry Polytechnic University named after S.M. Kirov; 5U, Institutsky Lane, St. Petersburg, Russia

³ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

⁴ Pacific National University, Tikhookeanskaya St. 136, Khabarovsk, Russia

⁵ National Research University ITMO, Kronverksky Ave., 49, St. Petersburg, Russia

^a hitrov_eg@spbstu.ru ^b surik1622@gmail.com, ^c ftslk@brstu.ru, ^d maksont_koksharov@mail.ru, ^e 000340@togudv.ru, ^f mamoskalenko@itmo.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>

^e <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-7121-7520>

Received 15.04.2026, accepted 15.05.2026

The article aims to develop an approach to planning the designation of trees for felling during the implementation of nature-like technological harvesting processes based on simulation modeling and combinatorial optimization methods. Model data on the location and volume of trees in a given area are used. A problem of finding the minimum penalty function is formulated, the solution to which simultaneously seeks an approximation to the optimal solution of the traveling salesman problem with "moving" vertices-functions representing the technological stops of the manipulator machine, determined by the approximation to the solution of the problem of maxi-

maximum diversity between trees left for further growing, with constraints-conditions. An algorithm and a program implementing methods of combinatorial optimization (simulated annealing algorithm) and machine learning (hierarchical clustering) are presented. An example of a calculation is given in which model trees are distributed over a 200×200 m plot as random variables with a uniform distribution, 100 points. The trunk volumes in the example are also randomly distributed, uniformly distributed (total volume $38,89 \text{ m}^3$; planned harvest volume 0,5 of the total). In the example, the estimated minimum length of the manipulator's route between stands was 788,5 m upon reaching the planned harvest volume. Based on the presented program, further research could involve computational experiments to determine the relationships between process and equipment parameters, the spatial distribution of trees, and trunk volumes, and target indicators. The results of further calculations will be useful not only for organizing production processes but will also help expand the theoretical base of the field of knowledge related to assessing the environmental friendliness and nature-likeness of forest management technologies.

Keywords: logging; nature-oriented technological processes; agglomerative clustering; diversity; traveling salesman problem; manipulator route.

Введение. При планировании и организации современных технологических процессов заготовки древесины и лесного хозяйства следует учитывать помимо факторов, определяющих классические технико-экономические показатели, ещё и дополнительные факторы, связанные с экологической эффективностью и энергоёмкостью продукции лесопользования [1–3]. На сегодняшний день актуальна проблематика синтеза технологических процессов с учётом комплекса условий, резюмированных в определении природоподобия технологических процессов [2]. Вместе с тем, внедрение сравнительно новых концепций лесопользования требует развития теоретической базы в области оценки и обоснования параметров технологических процессов с учётом насколько возможно широкого спектра показателей [2, 3]. В цикле работ [4–9] были представлены положения, относящиеся к прогнозу повреждаемости почвогрунтов, вызванной воздействием движителей лесной техники, впоследствии дополненные оценками энергоёмкости движения техники. Снижение повреждаемости почвогрунта полностью согласуется с концепцией природоподобия [2, 9]. Ещё одним актуальным направлением совершенствования технологии, в особенности – малообъёмного лесопользования, является заготовка и трелёвка под пологом леса без организации специальной сети волоков [10–12]. Кроме того, авторами [13] представлена модель назначения деревьев в рубку с максимизацией суммы попарных расстояний между деревьями, оставляемыми на дорастивание. Требование максимизации расстояния также согласуется с условием природоподобия – в таком случае обеспечиваются благоприятные условия для лесовосстановления [14, 15]; также известны рекомендации по ограничению минимального расстояния между соседними деревьями, оставляемыми на дорастивание [13, 16, 17]. Суммарное требование к технологическому процессу – минимизация длины маршрута манипуляторной техники с одновременной максимизацией свободного пространства и соблюдением планового объёма выборочной рубки образует нетривиальную оптимизационную задачу, решение которой требует дальнейших исследований.

Цель работы: развитие подхода к планированию назначения деревьев в рубку при реализации природоподобных технологических процессов заготовки на основе методов имитационного моделирования и комбинаторной оптимизации.

Материалы и методы исследования: модельные данные о расположении и объёме деревьев на заданной площади; методы комбинаторной оптимизации (алго-

ритм имитации отжига) и машинного обучения (иерархическая кластеризация).

Результаты исследования. В статье задача решается применительно к модельным данным: координатам и объёмам деревьев, принимаемым как равномерно распределённые величины в заданных диапазонах. При решении производственной задачи сведения могут быть получены, например, из таксационного описания древостоя и материалов лидарной съемки [13, 18–20].

Аналогично [13] условимся, что план p (назначение деревьев в рубку) кодируется в виде m -мерного вектора (m – число деревьев на рассматриваемой площади), в котором значение координаты, равное «1», означает назначение дерева в рубку, в противном случае, при значении «0», дерево оставляется на дорастивание.

Тогда суммарный объём вырубаемых деревьев q и его относительное отклонение L^q от планового объёма Q :

$$q = (p, v), L^q = \frac{|q - Q|}{Q}, \quad L^q = \frac{|(p, v) - Q|}{Q} \quad (1)$$

Обратим внимание, что в формуле (1) отклонение нормировано, $0 \leq L^q \leq 1$.

Сумма попарных расстояний между деревьями, оставляемыми на дорастивание:

$$d = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j>i}^m \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} [p_i = 0], \quad (2)$$

При решении оптимизационной задачи сумму по формуле (2), на наш взгляд, удобнее сопоставить с суммой расстояний между деревьями до рубки D , тогда:

$$D = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j>i}^m \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad L^d = \frac{D - d}{D}, \quad (3)$$

и относительное снижение «разнообразия» (аналогично оптимизационной задаче с оптимальным назначением при условии максимизации функции разнообразия, *maximum diversity problem*) по величине сопоставимо с L^q по формуле (1).

Также учтём минимальное расстояние между деревьями и сопоставим его с пороговым значением $r_{\min, \lim}$:

$$r_{\min, \lim} = \min_{i \neq j} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} [p_i = 0], \quad (4)$$

$$L^r = \left[\frac{r_{\min, \lim} - r_{\min}}{r_{\min, \lim}} \right]_+,$$

тогда в (4) $0 \leq L^r \leq 1$.

Несколько сложнее формализуется задача оценки суммы расстояний, проходимых манипуляторной машиной от одной технологической стоянки к другой. Координаты стоянок не определены входными данными, и связь их с планом может быть установлена различными способами. Предложим на настоящем этапе исследований следующий подход.

Положим, что «соседние» деревья в древостое, назначенные в рубку, последовательно объединяются в кластеры при помощи алгоритма агломеративной кластеризации. Добавление новых объектов (деревьев) в кластер происходит на основе расчёта метрики, например, расстояния Уорда, до тех пор, пока в каждом из кластеров максимальное расстояние от геометрического центра кластера, совпадающего с технологической стоянкой, до дерева, назначенного в рубку и отнесённого к n -ому кластеру, не превышает вылета манипулятора R , формально:

$$r_{\max}^{(n)} = \max_k \sqrt{(x_k^{(n)} - s_x^{(n)})^2 + (y_k^{(n)} - s_y^{(n)})^2}, \quad (5)$$

$$s_x^{(n)} = \bar{x}_k, s_y^{(n)} = \bar{y}_k, r_{\max}^{(n)} \leq R,$$

Тогда, при полученной на основе плана p разметке центров s , приближение к минимуму пути машины ищется на основе решения задачи коммивояжера перебором.

Далее найденное приближение $l(p)$ удобно сопоставить с некоторым базовым значением, например, с периметром участка, либо некоторой величиной L_0 , заведомо не меньшей найденного приближения:

$$L^l = \frac{l - L_0}{L_0} \quad (6)$$

Запишем относительные величины по (1), (3), (4), (6) в виде вектора L и рассмотрим минимизацию взвешенного среднего:

$$L = (L^q, L^d, L^r, L^l)^T, \quad (7)$$

$$C = \frac{(L, w)}{\|w\|_1} \rightarrow \min_p,$$

где веса w при слагаемых могут быть подобраны эвристическим путём, с учётом экспертной оценки важности отдельных слагаемых в конкретной задаче планирования, а также динамики снижения C , наблюдаемой при реализации вычислений.

Таким образом, одновременно ищется приближение к оптимальному решению задачи коммивояжера при «подвижных» вершинах-функциях, определяемых приближением к решению проблемы максимального разнообразия, причём с ограничениями-условиями. Слагаемые штрафа за отклонение от плана и минимальное расстояние между оставляемыми деревьями в некотором смысле разрешают проблему условной оптимизации, сводя задачу к оптимизации безусловной.

Для эвристического поиска приближения к решению (1) используем алгоритм имитации отжига (*annealing simulation*), поскольку специалисты в смежных областях знания, машинного обучения, оценивают его эффективность при решении задачи максимального

разнообразия весьма высоко. Кроме того, алгоритм отличается гибкостью настроек своих параметров, и уже получен положительный опыт его реализации при оптимизации технологических процессов лесозаготовительного производства в научной концепции развития природоподобных процессов лесопользования (на примере регионального планирования лесозаготовок в условиях Дальнего Востока [2]).

Для реализации решения подготовлена программа на ЯП Python, использующая средства библиотеки Scipy. Программа доступна в ознакомительных целях по ссылке [clck.ru/3TBXBF]. Алгоритм в виде блок-схемы представлен на рис. 1.

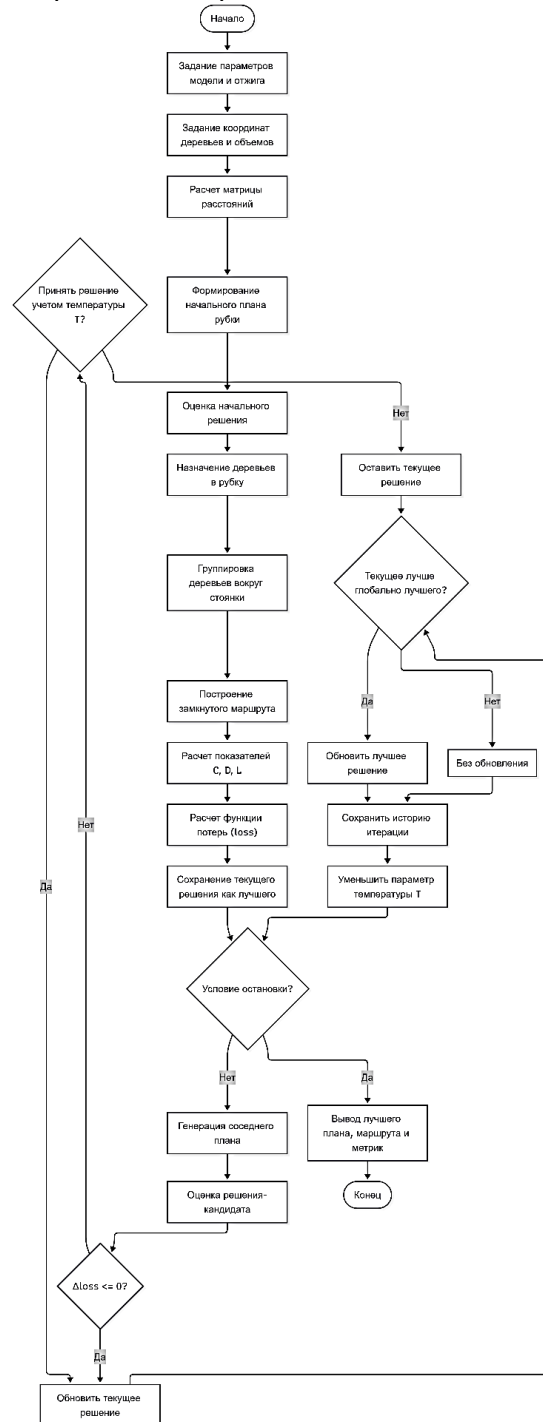


Рис. 1. Алгоритм решения комбинаторной задачи назначения деревьев в рубку с минимизацией пути манипуляторной машины между технологическими стоянками

Приведём пример реализации представленного подхода-алгоритма (рис. 2–4).

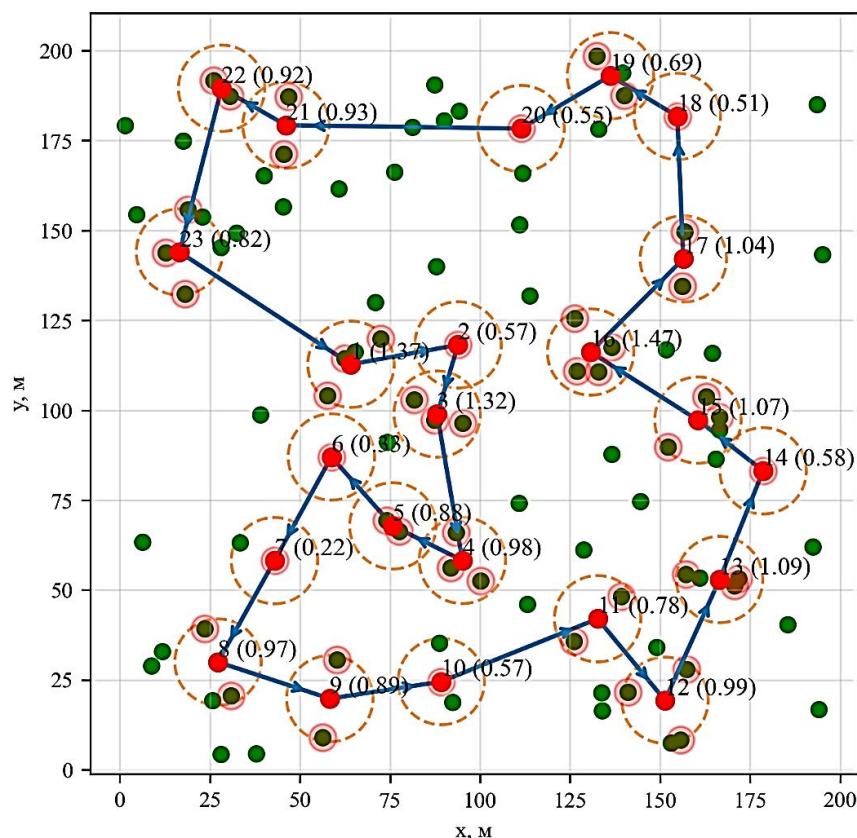


Рис. 2. Пример разметки модельных данных при помощи предлагаемого алгоритма: зеленые точки – деревья, оставляемые на доращивание, красные точки – назначение в рубку и места технологических стоянок (нумерация, возрастающая по приближению к минимуму пути машины, в скобках указаны объёмы заготовленной древесины)

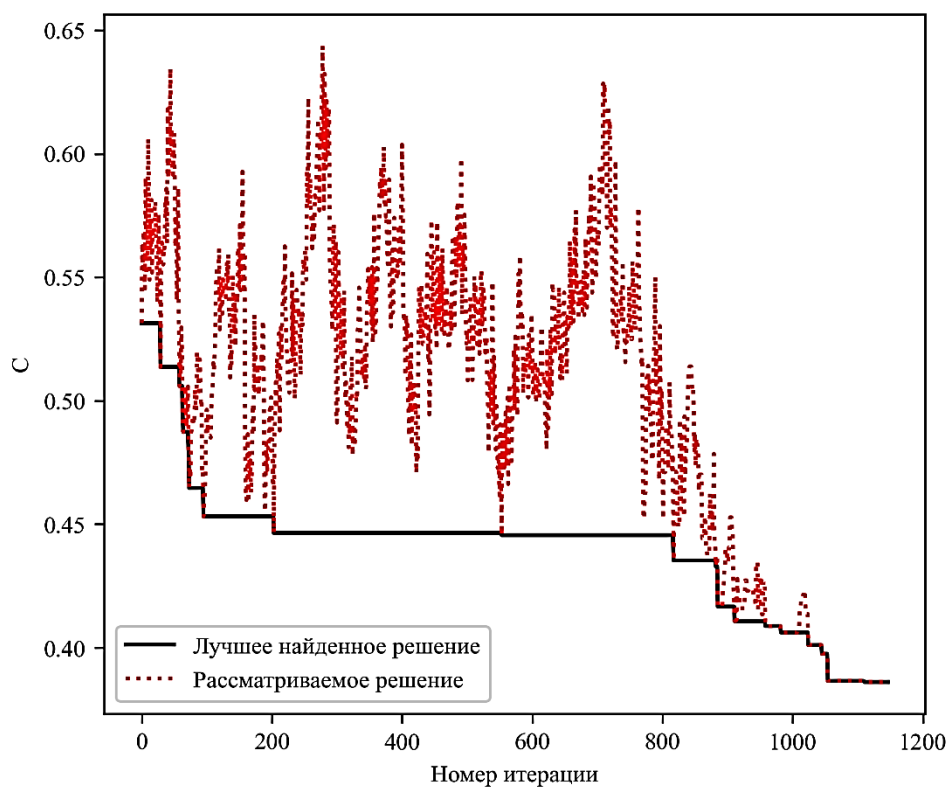


Рис. 3. Динамика суммарной функции потерь в алгоритме имитации отжига при разметке модельных данных

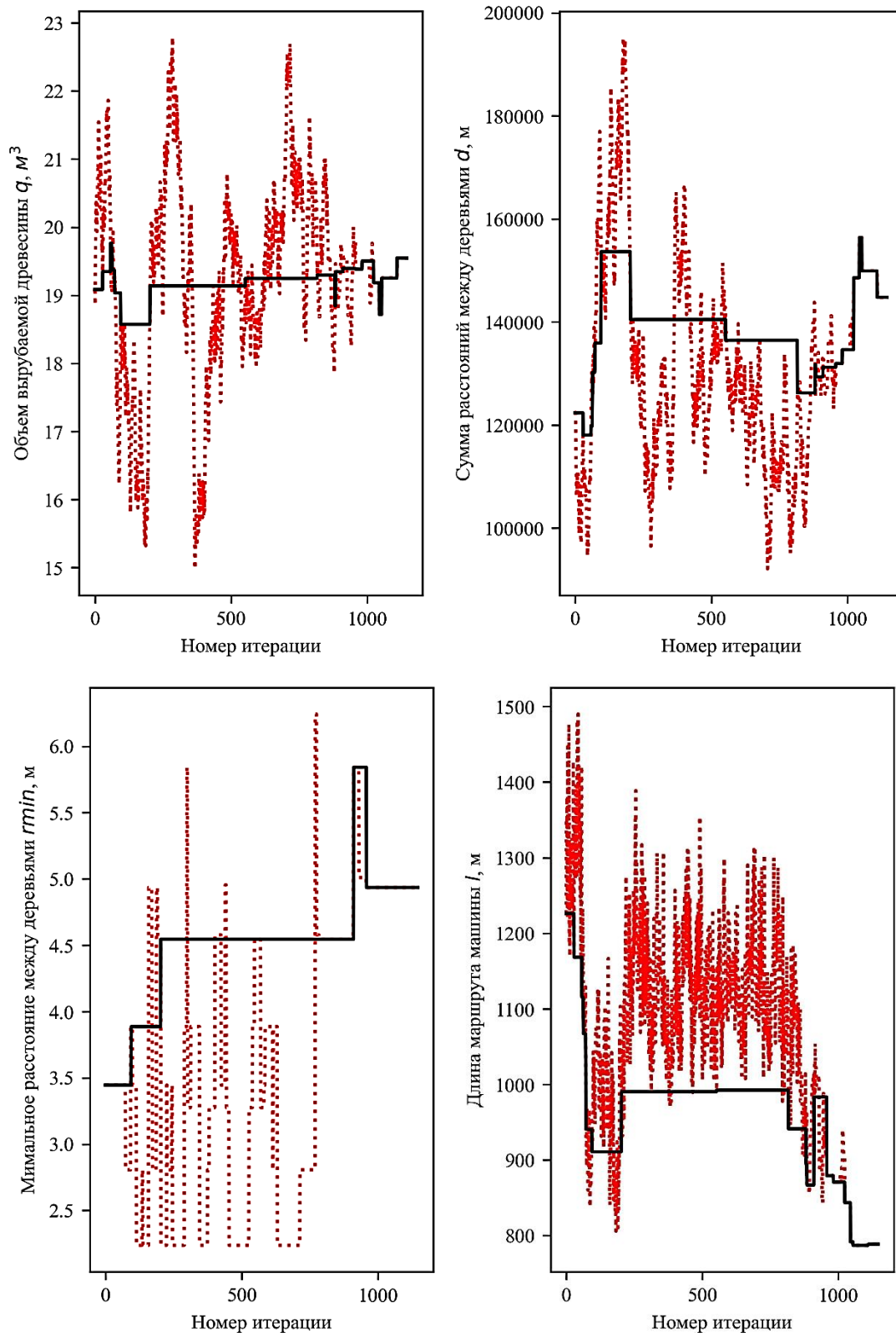


Рис. 4. Динамика составляющих суммарной функции потерь (сплошная линия – в лучшем из планов, найденных при помощи имитации отжига, красная пунктирная линия – в рассматриваемом на текущей итерации плане-кандидате)

Для приведённого примера расчёта модельные деревья распределены на участке 200×200 м как случайные величины с равномерным распределением 100 точек. Объёмы стволов – также случайные равномерно распределённые величины $\sim U(0,4;0,6)$ (суммарный объём $38,89 \text{ м}^3$; плановый объём заготовки $0,5$ суммар-

ного). Вылет манипулятора $R = 12$ м. «Пороговое» значение для минимального расстояния между деревьями, оставляемыми на доразживание, $r_{\min, \lim} = 5$ м. Алгоритм имитации отжига как при поиске приближения в оптимальному плану, так и при решении подзадачи построения маршрута, реализован при параметре охлаждения

$\tau = 0,99$ вплоть до $T_{\min} = 1$ с ограничением на число итераций 2000. Веса прилагаемых C соответственно $\{3,5;1,0;2,0;1,9\}$ в примере подобраны эвристически для иллюстрации результатов. В примере оценка минимальной длины маршрута манипуляторной машины между стоянками составила 788,5 м при достижении планового объема заготовки.

Заключение. Продемонстрированный пример показывает, что подход в целом позволяет успешно справиться с приближением оптимального решения о назначении деревьев в рубку при комплексном характере функции потерь (штрафов). Считаем, что в дальнейших исследованиях на основе представленного алгоритма и программы для его реализации возможны вычислительные эксперименты для определения связей параметров технологического процесса и оборудования, пространственного распределения деревьев и объемов стволов с целевыми показателями. Важно отметить, что при реализации решения получена оценка длины маршрута манипуляторной машины, которая может использоваться для общей оценки повреждаемости почвогрунта при движении техники под пологом леса. Использование алгоритма агломеративной кластериза-

ции позволило не только разметить места технологических стоянок, но и оценить объем заготовленной на них древесины – в дальнейшем возможно развитие модели с целью определить путь трелёвочной машины, который также может интегрироваться в суммарную функцию потерь для плана рубки. По размеченным местам технологических стоянок возможна и ещё более подробная оценка повреждаемости почвогрунта, связанная с маневрированием техники (даётся по результатам вычисления углов между векторами движения машины от центра кластера к центру, соседнему в маршруте). На наш взгляд, результаты дальнейших вычислений будут полезны не только с точки зрения организации производственных процессов, но и позволят дополнить теоретическую базу отрасли знаний, связанную с оценкой экологичности и природоподобия технологии лесопользования.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-16-00092.

Литература

- Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Побединский В.В., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф. Повышение эффективности мультифункциональных машин для ведения интенсивного лесного хозяйства // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 1 (379). С. 138–149.
- Мехренцев А.В., Герц Э.Ф., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф., Ефимов Ю.В. Природоподобные лесные технологии как фактор снижения техногенных угроз в условиях интенсивного ведения лесного хозяйства // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 4 (64). С. 144–150.
- Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. 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. Т. 18. № 4. С. 190–200.
- Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Савченко С.И., Тихонов Е.А., Ревяко С.И., Перфильев П.Н. Влияние маневрирования движителя колесной лесной машины на её проходимость в сложных геотехнических условиях // Лесотехнический журнал. 2025. Т. 15. № 3 (59). С. 228–244.
- Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Ekipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Т. 19. № 2. С. 439–447.
- Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. Т. 18. № 3. С. 95–102.
- Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Druzyanova V., Timokhova O., Ivanov V., Kruchinin I. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas // Journal of Terramechanics. 2022. Т. 101. С. 1–9.
- Hertz E., Guriev A., Druzyanova V., Revyako S., Markov O., Perfiliev P., Grigorev I. Impact assessment of different propulsion systems in forestry machinery on soil properties // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2024. Т. 11. № 1. С. 133–140.
- Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Khakhina A., Burmistrova O., Sukhomlinova N., Zhuk A. Methodology for assessing and managing the environmental performance of skidding and feller buncher tractors // Forests. 2021. Т. 12. № 12.
- Теринов Н.Н., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Залесов С.В., Терехов Г.Г., Толкач О.В. Технологические схемы использования мини-тракторов на рубках ухода за лесом // Resources and Technology. 2023. Т. 20. № 4. С. 1–27.
- Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф. Обоснование технологических параметров процесса трелёвки древесины мини-трактором при проходных рубках // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022. № 6 (390). С. 126–138.
- Мехренцев А.В., Герц Э.Ф., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф. Технологический процесс выборочных рубок с применением малогабаритного трактора // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 1 (88). С. 142–150.
- Рэго 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 // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2025. № 2 (404). С. 38–50.
- Теринов Н.Н., Побединский В.В., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Уразова А.Ф., Ефимов Ю.В. Алгоритм лесообразовательного процесса в ельниках с учетом лесохозяйственных мероприятий // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2026. № 1 (409). С. 134–146.
- Grigorieva O.I., Runova E.M., Tikhonov E.A., Storodubtseva T.N., Druzyanova V.P., Gerts E.F., Garus I.A., Grigorev I.V. Dynamics of the taxation characteristics of forest stands in the North-West of Russia // Polish Journal of Environmental Studies. 2022. Т. 31. № 5. С. 4107–4115.
- Дерюгин Н.А., Герц Э.Ф. Обоснование технологических параметров ленты, разрабатываемой манипуляторной лесозаготовительной машиной, при выборочных рубках с учетом доступности // Леса России и хозяйство в них. 2021. № 2 (77). С. 52–57.
- Герц Э.Ф., Уразова А.Ф., Теринов Н.Н. Риски повреждения деревьев при перемещении лесозаготовительных ма-

шин под пологом древостоя // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2024. № 65. С. 167–169.

18. Куницкая О.А., Иванов К.Л., Должиков И.С., Михайлова Л.М., Григорьев И.В. Использование беспилотных транспортно-технологических комплексов в лесном и садово-парковом хозяйстве // Вестник АГАТУ. 2025. № 3 (19). С. 48–91.
 19. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Savchenkova V., Hertz E., Voronova A., Shvetsova V., Grigorev I., Lavrov M. Comparative analysis of thinning techniques in pine forests // Journal of Forestry Research. 2022. T. 33. № 4. С. 1145–1156.
 20. Rego G.E., Voronov R.V. Dynamic path planning algorithm for autonomous mobile robot with a minimum number of turns in unknown environment // Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes. 2023. T. 19. № 2. С. 264–274.
- References*
1. Gerts E.F., Mekhrentsev A.V., Pobedinsky V.V., Terinov N.N., Urazova A.F. Improving the efficiency of multifunctional machines for intensive forestry // News of higher educational institutions. Forestry journal. 2021. No. 1 (379). Pp. 138–149.
 2. Mekhrentsev A.V., Gerts E.F., Terinov N.N., Urazova A.F., Efimov Yu.V. Nature-like forest technologies as a factor in reducing man-made threats in conditions of intensive forestry // Systems. Methods. Technologies. 2024. No. 4 (64). Pp. 144–150.
 3. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. 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. No. 4. pp. 190–200.
 4. Shapiro V.Ya., Grigoriev I.V., Savchenko S.I., Tikhonov E.A., Revyako S.I., Perfil'ev P.N. The influence of maneuvering the propeller of a wheeled forestry machine on its cross-country ability in complex geotechnical conditions // Forest Engineering Journal. 2025. Vol. 15. No. 3 (59). pp. 228–244.
 5. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction // Journal of Applied Engineering Science. 2021. T. 19. No. 2. P. 439–447.
 6. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tire preservation in forestry machinery and forest soils // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. T. 18. No. 3. P. 95–102.
 7. Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Druzyanova V., Timokhova O., Ivanov V., Kruchinin I. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas // Journal of Terramechanics. 2022. T. 101. P. 1–9.
 8. Hertz E., Guriev A., Druzyanova V., Revyako S., Markov O., Perfiliev P., Grigorev I. Impact assessment of different propulsion systems in forestry machinery on soil properties // Mathematical Modeling of Engineering Problems. 2024. T. 11. No. 1. P. 133–140.
 9. Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Khakhina A., Burmistrova O., Sukhomlinova N., Zhuk A. Methodology for assessing and managing the environmental performance of skidding and feller buncher tractors // Forests. 2021. Vol. 12. No. 12.
 10. Terinov N.N., Hertz E.F., Mekhrentsev A.V., Zalesov S.V., Terekhov G.G., Tolkach O.V. Technological schemes for using mini-tractors in forest thinning // Resources and Technology. 2023. Vol. 20. No. 4. pp. 1–27.
 11. Hertz E.F., Mekhrentsev A.V., Terinov N.N., Urazova A.F. Justification of the technological parameters of the process of wood skidding with a mini-tractor during thinning // News of higher educational institutions. Forestry journal. 2022. No. 6 (390). P. 126–138.
 12. Mekhrentsev A.V., Gerts E.F., Terinov N.N., Urazova A.F. Technological process of selective logging using a small-sized tractor // Forests of Russia and their management. 2024. No. 1 (88). P. 142–150.
 13. Rego G.E., Grigorieva O.I., Grigoriev I.V., Voronova A.M., Dolzhikov I.S., Druzyanova V.P. Mathematical model of tree selection in a homogeneous stand during thinning // News of higher educational institutions. Forestry journal. 2025. No. 2 (404). P. 38–50.
 14. Terinov N.N., Pobedinsky V.V., Gerts E.F., Mekhrentsev A.V., Urazova A.F., Efimov Yu.V. Algorithm of the forest formation process in spruce forests taking into account forestry measures // News of higher educational institutions. Forestry journal. 2026. No. 1 (409). P. 134–146.
 15. Grigorieva O.I., Runova E.M., Tikhonov E.A., Storodubtseva T.N., Druzyanova V.P., Gerts E.F., Garus I.A., Grigorev I.V. Dynamics of the taxation characteristics of forest stands in the North-West of Russia // Polish Journal of Environmental Studies. 2022. Vol. 31. No. 5. Pp. 4107–4115.
 16. Deryugin N.A., Gerts E.F. Justification of technological parameters of the tape developed by a manipulator logging machine during selective felling, taking into account accessibility // Forests of Russia and their management. 2021. No. 2 (77). Pp. 52–57.
 17. Gerts E.F., Urazova A.F., Terinov N.N. Risks of tree damage when moving logging machines under the canopy // Actual problems of the forest complex. 2024. No. 65. Pp. 167–169.
 18. Kunitskaya O.A., Ivanov K.L., Dolzhikov I.S., Mikhailova L.M., Grigoriev I.V. Use of unmanned transport and technological complexes in forestry and landscape gardening // Bulletin of AGATU. 2025. No. 3 (19). Pp. 48–91.
 19. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Savchenkova V., Hertz E., Voronova A., Shvetsova V., Grigorev I., Lavrov M. Comparative analysis of thinning techniques in pine forests // Journal of Forestry Research. 2022. Vol. 33. No. 4. Pp. 1145–1156.
 20. Rego G.E., Voronov R.V. Dynamic path planning algorithm for an autonomous mobile robot with a minimum number of turns in an unknown environment // Bulletin of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes. 2023. Vol. 19. No. 2.