

Повышение эффективности проведения рубок ухода за лесом (лесовосстановления) с помощью методов искусственного интеллекта

Рого Григорий Эйнович

17.02.2025

- В процессе роста и развития древостоя внутри него возникают конкурентные отношения.
- Конкуренция бывает внутривидовая и межвидовая, активная и пассивная.
- В результате конкурентной борьбы деревья в насаждении разделяются на различные классы (например, **классы Крафта**).
- Управление конкурентными отношениями важно для формирования состава и товарной структуры будущего древостоя.

Конкуренция и ресурсы

- Конкуренция регулирует процесс роста и развития древостоя в популяции.
- Основные ресурсы конкуренции:
 - Свет (может регулироваться через густоту насаждения)
 - Влага
 - Элементы почвенного питания (количество в почве ограничено)
- Лесные почвы обычно бедные и кислые, что усиливает конкуренцию за питание.
- Внутривидовая конкуренция обычно острее, чем межвидовая.

Рубки ухода

- Рубками ухода можно заменить естественный отбор искусственным.
- Человек сам осуществляет отбор деревьев:
 - В рубку удаляются деревья по определённым критериям:
 - Класс Крафта
 - Санитарное состояние
 - Механические дефекты
 - Принадлежность к целевой породе
 - Деревья, оставляемые на доразращивание, также отбираются по важным признакам.
 - Учитывается расположение деревьев относительно друг друга.
- При прочих равных условиях наиболее оптимально оставлять между деревьями максимально возможное расстояние.

Вопросы фитоценотического и лесоводственного подхода

- Как в процессе роста и развития соседние деревья влияют друг на друга?
- Как происходит дифференциация деревьев на господствующие и отстающие?
- На каком расстоянии должны располагаться деревья относительно друг друга?
- Какое расположение деревьев оптимально с точки зрения товарной и биологической структуры?

Подеревная лазерная съёмка (общие положения)

- Широко используется технология LIDAR для составления подеревного плана насаждения.
- Фиксируются координаты каждого дерева и некоторые их характеристики (порода, диаметр и т.д.).
- Получение данных возможно тремя основными способами:
 - Наземное лазерное сканирование
 - Мобильное лазерное сканирование
 - Воздушное лазерное сканирование
- Данные о размещении деревьев позволяют частично автоматизировать процесс отбора деревьев в рубку.

Наземное лазерное сканирование

- Оператор сканера делает параллельные ходы с расстоянием 10–15 м.
- Производительность: 5–7,5 га/смену, иногда до 15 га/смена.
- Не требуется постоянный спутниковый GNSS сигнал.
- Достигается высокая точность, но подрост и подлесок могут затруднять процесс.



Мобильное лазерное сканирование

- Применяется мобильная станция (лазерный сканер + инерциальная система + GNSS-приёмник).
- Можно устанавливать на небольшую колесную или гусеничную технику (мини-трактор и т.п.).
- Существенно выше производительность, чем при наземном сканировании.
- Точность ниже (сложно определить диаметры), необходим открытый небосвод для GNSS.

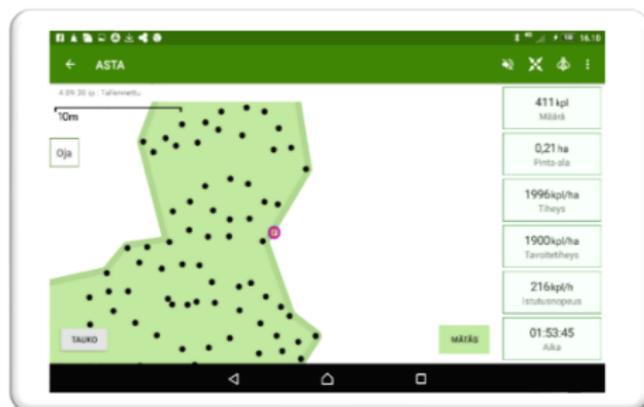
Воздушное лазерное сканирование

- Даёт максимальную производительность, но меньшую точность (кривизна стволов влияет на координаты).
- Важно учитывать нормативные аспекты при использовании БПЛА (беспилотных летательных аппаратов).
- Позволяет оценить объём кроны (прогноз трудоёмкости очистки лесосеки, использование порубочных остатков).



Координатная карта посадки

- При создании насаждений искусственным путём (лесные плантации и т.п.) некоторые лесопользователи ставят GPS-метку каждому посаженному сеянцу (саженцу).
- Такой подход позволяет точно знать местоположение каждого дерева
- Анализировать развитие насаждения в динамике
- Оптимизировать уход, в том числе планировать маршруты лесозаготовительной техники



Автоматизация отбора деревьев в рубку

- Подеревные LIDAR-данные позволяют частично автоматизировать процесс отбора деревьев.
- Алгоритмы могут учитывать:
 - Породный состав
 - Диаметры и санитарное состояние
 - Пространственное расположение деревьев
- Координаты вырубаемых деревьев загружаются в бортовой компьютер лесозаготовительной машины.
- Повышается эффективность рубок ухода за лесом:
 - Достижение оптимума состава древостоя
 - Оптимизация маршрутов техники и расположения трелевочных волоков

Необходимость моделей оптимального расстояния

- Требуется разработка моделей, позволяющих рассчитать оптимальное расстояние между деревьями в зависимости от:
 - Размещения в древостое
 - Диаметра
 - Породы
- Цель — обеспечить:
 - Оптимальное использование ресурсов (свет, влага, питание)
 - Формирование желаемой товарной структуры
 - Сокращение негативного влияния конкуренции на целевые деревья

Формализация задачи

- В лесном хозяйстве необходимо учитывать пространственное размещение деревьев.
- Одна из ключевых задач — определение оптимального расположения деревьев для уменьшения конкуренции.
- Один из вариантов максимизации разнообразия (Maximum Diversity Problem, MDP) заключается в максимизации суммарного расстояния между деревьями.

Формализация задачи

Задачу можно рассматривать с двух точек зрения:

- Поиск множества точек посадки и оценка этого множества. Критериями оценки являются критерии разнообразия.
- Выбор деревьев оставляемых на доращивание (то есть отбор m деревьев из имеющихся n деревьев, где $m < n$)

Формализация задачи

- Пусть дано множество потенциальных мест посадки (или уже растущих) деревьев $V = \{1, 2, \dots, n\}$.
- Для каждого возможного размещения $i, j \in V$ задано расстояние d_{ij} .
- Необходимо выбрать подмножество $S \subset V$ из k элементов, такое что сумма попарных расстояний между выбранными точками максимальна:

$$\max \sum_{i \in S} \sum_{j \in S, j > i} d_{ij} \quad (1)$$

- Ограничение: $|S| = k$, где k — заданное число деревьев.

Пример задачи

- Пусть имеется 5 возможных позиций деревьев.
- Дано матричное представление расстояний между ними:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 4 & 7 & 3 & 6 \\ 4 & 0 & 2 & 5 & 8 \\ 7 & 2 & 0 & 6 & 3 \\ 3 & 5 & 6 & 0 & 4 \\ 6 & 8 & 3 & 4 & 0 \end{bmatrix}$$

- Необходимо выбрать $k = 3$ позиции так, чтобы сумма расстояний между ними была максимальной.

Жадный алгоритм решения

Algorithm 1 Жадный алгоритм выбора деревьев

Вход: множество позиций V , расстояния d_{ij} , число деревьев k .

Выход: множество S оптимально расположенных деревьев.

1: Выбрать первое дерево случайным образом, $S = \{s_1\}$.

for каждого последующего дерева до k **do**

2: Выбрать дерево s_j такое, что суммарное расстояние до уже выбранных деревьев максимальное:

$$s_j = \arg \max_{j \in V \setminus S} \sum_{s \in S} d_{sj}$$

3: Добавить s_j в S .

end for

4: Вернуть множество S .

Оптимальные методы решения

- Задача является NP-трудной.
- Возможные методы решения:
 - Точные методы:
 - Перебор всех возможных комбинаций (экспоненциальная сложность).
 - Целочисленное линейное программирование.
 - Эвристики и метаэвристики:
 - Жадные алгоритмы.
 - Генетические алгоритмы.
 - Метод муравьиных колоний.
 - Имитация отжига.
- В реальных задачах часто применяются гибридные алгоритмы.

Расширенная модель задачи MDP

- В реальном лесоводстве необходимо учитывать дополнительные параметры:
 - Порода деревьев.
 - Бонитет (качество почвы и условий произрастания).
 - Диаметр ствола.
 - Возраст деревьев.
 - Экологическая совместимость и устойчивость к болезням.
- Цель — разработать модифицированные математические модели учитывающие эти факторы.

Расширенная модель задачи MDP

- Пусть дано множество потенциальных мест посадки деревьев $V = \{1, 2, \dots, n\}$.
- Каждое место характеризуется рядом параметров:
 - d_{ij} — расстояние между деревьями i и j .
 - s_i — порода дерева в точке i .
 - q_i — бонитет участка в точке i .
 - a_i — возраст дерева (если учитываем существующий лес).
 - D_i — диаметр ствола.
- Необходимо выбрать k позиций, чтобы максимизировать функционал:

$$\max \sum_{i \in S} \sum_{j \in S, j > i} (w_d d_{ij} + w_s f(s_i, s_j) + w_q |q_i - q_j| + w_a |a_i - a_j| + w_D |D_i - D_j|) \quad (2)$$

- Где w_d, w_s, w_q, w_a, w_D — веса параметров.
- $f(s_i, s_j)$ — функция, задающая разнообразие пород.

Учет породы деревьев

- Разнообразие пород важно для устойчивости экосистемы.
- Можно использовать функцию сходства пород:

$$f(s_i, s_j) = \begin{cases} 1, & s_i \neq s_j \\ 0, & s_i = s_j \end{cases} \quad (3)$$

- Веса пород можно назначить на основе их экологической совместимости (если таковая имеется и влияет на эффективность лесного хозяйства).

Учет бонитета (качества почвы)

- Бонитет отражает продуктивность и качество лесных насаждений.
- Различие бонитетов важно, так как некоторые породы предпочитают определенные условия.

Учет диаметра и возраста деревьев

- Для устойчивости леса важно комбинировать деревья разного возраста и размера.
- Возможно, эти параметры стоит учитывать в рамках одного критерия:

$$\max \sum_{i \in S} \sum_{j \in S, j > i} (w_D |D_i - D_j| + w_a |a_i - a_j|) \quad (4)$$

где w_D, w_a - веса соответствующих параметров.

- Это обеспечит равномерное распределение деревьев по стадиям роста.

Ограничения и дополнительные факторы

- Ограничения на максимальную плотность:

$$\forall i, j \in S, \quad d_{ij} \geq d_{\min} \quad (5)$$

- Экологическая совместимость пород: нельзя сажать конкурирующие виды рядом.
- Адаптивные модели: можно учитывать будущие изменения климата и прогнозируемый рост деревьев.
- Гибридные решения: возможно использование генетических алгоритмов и машинного обучения для оптимального планирования.

Применение в лесном хозяйстве

- Оптимизация лесопосадок: создание устойчивых и разнородных насаждений.
- Автоматизированное планирование: загрузка параметров в GIS-системы и лесоуправляющие платформы.
- Мониторинг и контроль: использование дронов и LIDAR для контроля за динамикой насаждений.
- Устойчивое развитие: повышение устойчивости лесов к изменению климата и болезням.

Методы ИИ для решения задачи

- Возможности ИИ:
 - Улучшение точности и скорости поиска оптимального решения.
 - Адаптивность к изменяющимся условиям среды.
 - Возможность комбинирования эвристических и оптимизационных подходов.
- Вопрос: какие методы ИИ могут быть применены и как они помогут решать MDP в лесовосстановлении?

Генетические алгоритмы (GA)

- Идея: использовать эволюционные принципы для поиска наилучшего расположения деревьев.
- Генетическое представление:
 - Индивид = возможное распределение деревьев в лесу.
 - Фитнес-функция (функция приспособленности) = максимизация функции разнообразия:

$$f(S) = \sum_{i \in S} \sum_{j \in S, j > i} (w_d d_{ij} + w_s f(s_i, s_j) + w_q |q_i - q_j| +$$

$$+ w_a |a_i - a_j| + w_D |D_i - D_j|$$

- Операторы эволюции:
 - Скрещивание — комбинация двух решений.
 - Мутация — случайные изменения позиций деревьев.
 - Отбор — выбор лучших решений на основе фитнес-функции.
- Плюсы: хорош для сложных задач с большим числом параметров.
- Минусы: может сходиться к локальному минимуму.

Метод роя частиц (PSO)

- Идея: моделирование поведения роя птиц или косяка рыб.
- Частица — возможное распределение деревьев.
- Каждая частица движется в пространстве решений, корректируя свое положение по следующей формуле:

$$v_i^{(t+1)} = \omega v_i^{(t)} + c_1 r_1 (p_{\text{best},i} - x_i^{(t)}) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - x_i^{(t)})$$

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)}$$

- Плюсы:
 - Хорошо работает для многомерных пространств.
 - Быстро сходится к хорошим решениям.
- Минусы:
 - Иногда преждевременно сходится к неидеальному решению.
 - Чувствителен к настройке параметров.

Глубокое обучение и нейросети

- Использование нейросетей:
 - Глубокие нейросети (DNN): обучаются на данных о лучших конфигурациях деревьев.
 - Рекуррентные сети (RNN): моделируют динамику леса во времени.
 - Сверточные сети (CNN): анализируют спутниковые снимки и LIDAR-данные.
- Применение генеративных моделей:
 - Генеративно-сопоставительные сети (GAN) могут предлагать новые возможные посадочные схемы.
 - Автокодировщики (Autoencoders) находят скрытые закономерности в данных.
- Плюсы:
 - Способность находить сложные зависимости.
 - Адаптация к реальным данным (LIDAR, снимки, лесоустроительные карты).
- Минусы:
 - Требуется большого объема данных для обучения.
 - Высокие вычислительные затраты.

Комбинация методов

- Гибридные подходы:
 - Генетические алгоритмы + нейросети (обучение операторов эволюции).
 - Метод роя частиц + градиентный спуск (гибридная оптимизация).
 - Нейросети + эвристики для ускоренного поиска решений.
- Пример гибридного алгоритма:
 - 1 Генетический алгоритм генерирует начальное множество возможных конфигураций.
 - 2 Нейросеть оценивает их пригодность на основе реальных данных.
 - 3 PSO уточняет параметры и выбирает финальное распределение деревьев.

Заключение

- Конкуренция — ключевой фактор, влияющий на рост и развитие древостоя.
- Рубки ухода позволяют управлять конкурентными отношениями и формировать состав насаждения.
- Технология LIDAR (включая наземное, мобильное и воздушное сканирование) открывает новые возможности:
 - Создание точных координатных планов
 - Автоматизация отбора деревьев в рубку
 - Оптимизация лесохозяйственных операций
- Разработка моделей оптимального расстояния между деревьями и их характеристик — важный шаг к цифровизации лесного хозяйства.

Заключение

- Задача максимального разнообразия (MDP) может быть адаптирована для лесовосстановления.
- Учет породы, бонитета, диаметра и возраста повышает качество посадок.
- Возможны дополнительные улучшения: машинное обучение, гибридные методы.
- Будущие исследования могут учитывать долговременные изменения и динамику роста деревьев.

Заключение

- Методы искусственного интеллекта могут значительно ускорить и улучшить процесс оптимального распределения деревьев.
- Генетические алгоритмы и метод роя частиц позволяют решать сложные комбинаторные задачи.
- Глубокое обучение даёт возможность учитывать сложные зависимости и динамику развития леса.
- Гибридные алгоритмы могут объединять лучшее из нескольких подходов.
- Будущее направление: использование ИИ для прогнозирования изменения структуры лесов в долгосрочной перспективе.