

Научная статья

УДК 630*232:631.412

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-60-76

Влияние почвенных свойств в дискретных микроповышениях на рост сеянцев ели обыкновенной *Picea abies* (L.) Karst

А.С. Ильинцев^{1,2}✉, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., доц.; ResearcherID: [N-6286-2019](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4665>

Е.Н. Наквасина², д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [A-5165-2013](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

А.Г. Волков², канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [D-7384-2017](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3082-6263>

А.П. Богданов^{1,2}, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., доц.; ResearcherID: [A-8611-2019](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

Н.А. Буньков², аспирант; ResearcherID: [MGW-2663-2025](#),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5216-8843>

¹Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; a.ilintsev@narfu.ru✉, aleksandr_bogd@mail.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; a.ilintsev@narfu.ru✉, nakvasina@yandex.ru, a.g.volkov@narfu.ru, aleksandr_bogd@mail.ru, bunjkov.n@edu.narfu.ru

Поступила в редакцию 25.05.24 / Одобрена после рецензирования 14.08.24 / Принята к печати 16.08.24

Аннотация. Целью исследования было выявление наиболее значимых для обеспечения роста ели обыкновенной почвенных факторов корнеобитаемого слоя (водно-физические и агрохимические). Научные работы проводили в 5-летних культурах, созданных по микроповышениям, подготовленным экскаватором на свежей вырубке черничного типа леса в Вилегодском лесничестве Архангельской области. Использовали 2-летний посадочный материал ели обыкновенной с закрытой корневой системой (2,0 тыс. шт./га). На 1 микроповышение высаживали 2–3 сеянца: в центр, в край от ямы и в край у ямы, образующейся при подготовке посадочного места. Замеряли основные биометрические показатели у сеянцев (60 шт.) и у близкого по возрасту подроста ели (40 шт.) последующей генерации на пасеке. Для анализа данных применяли методы многомерной статистики. Определено, что наиболее отзывчивыми на различия условий произрастания являются высота растения, связанная с приростом, а также длина боковых корней. Выявлено, что по сходству водно-физических и агрофизических свойств в корнеобитаемом слое ели, растущей на пасеке, ближе центральная часть посадочного места. Эти условия способствовали и лучшему росту сеянцев в центре по сравнению с краями микроповышения (у ямы и от ямы). Установлено, что приоритет в обеспечении ростовых параметров ели в 1-е годы жизни в большей степени принадлежит водно-физическим свойствам, таким как высота насыпи, пористость, плотность твердой фазы, влажность, а также тесно связанным с ними плотности сложения и пористости аэрации. В то же время из агрохимических показателей значимыми оказались только содержание калия и фосфора (на уровне тенденции). В практическом отношении полученные результаты позволяют скорректировать рекомендации по дискретной обработке почвы экскаватором и размещению посадочного материала в посадочных местах. Они будут полезны

при прогнозировании роста посадочного материала посредством экспресс-методов почвенных исследований.

Ключевые слова: лесные культуры, рост, водно-физические свойства почвы, агрохимические свойства почвы, влияние на рост, моделирование взаимовлияния

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>. Базовые химические свойства почвы определены в аккредитованной испытательной лаборатории на базе ФГБУ САС «Архангельская».

Для цитирования: Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н., Волков А.Г., Богданов А.П., Буньков Н.А. Влияние почвенных свойств в дискретных микроповышениях на рост сеянцев ели обыкновенной *Picea abies* (L.) Karst // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 60–76. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-60-76>

Original article

The Influence of Soil Properties in Discrete Mounds on the Growth of Norway Spruce (*Picea abies* L. Karst.) Seedlings

Aleksey S. Ilintsev^{1,2✉}, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-6286-2019](https://orcid.org/0000-0003-3524-4665), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4665>

Elena N. Nakvasina², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

Alexey G. Volkov², Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [D-7384-2017](https://orcid.org/0000-0002-3082-6263), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3082-6263>

Alexander P. Bogdanov^{1,2}, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist, Assoc. Prof.; ResearcherID: [A-8611-2019](https://orcid.org/0000-0002-1655-7212), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

Nikita A. Bun'kov², Postgraduate Student; ResearcherID: [MGW-2663-2025](https://orcid.org/0009-0006-5216-8843), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5216-8843>

¹Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; a.ilintsev@narfu.ru✉, aleksandr_bogd@mail.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; a.ilintsev@narfu.ru✉, nakvasina@yandex.ru, a.g.volkov@narfu.ru, aleksandr_bogd@mail.ru, bunjkov.n@edu.narfu.ru

Received on May 25, 2024 / Approved after reviewing on August 14, 2024 / Accepted on August 16, 2024

Abstract. The aim of the study has been to identify the most significant soil factors of the root layer (water-physical and agrochemical) for ensuring the growth of Norway spruce. The research has been carried out in 5-year-old crops created at the mounds prepared by an excavator at the fresh cutting of blueberry-type forest in the Vilegodsky forestry of the Arkhangelsk Region. 2-year-old planting stock of Norway spruce with a closed root system (2.0 thousand pcs./ha) has been used. For 1 mound, 2–3 seedlings have been planted: in the centre, at the edge away from the hole, and at the edge near the hole formed during the preparation of the planting site. The main biometric parameters have been measured in seedlings (60 pcs.) and in similarly aged spruce undergrowth (40 pcs.) of the subsequent generation in the cutting strip. Multivariate statistics methods have been used to analyze the data. It has been determined that the most responsive to differences in growing conditions are plant height associated with growth, as well as the length of lateral roots. It has been found that, based on the similarity of water-physical and agrophysical properties in the root layer of spruce grow-



ing in the cutting strip, the central part of the planting site is closer. These conditions have also contributed to a better growth of seedlings in the centre, compared to the edges of the mound (near the hole and away from the hole). It has been established that the priority in ensuring the growth parameters of spruce in the 1st years of life largely belongs to water-physical properties, such as the mound height, porosity, solid body density, and moisture content, as well as the closely related density of soil structure and aeration porosity. At the same time, of the agrochemical indicators, only the content of potassium and phosphorus (at the trend level) have turned out to be significant. In practical terms, the results obtained make it possible to adjust the recommendations for discrete soil tillage with an excavator and the placement of planting material in planting sites. They will be useful in predicting the growth of planting material using rapid methods of soil research.

Keywords: forest crops, growth, water-physical properties of the soil, agrochemical properties of the soil, impact on growth, modeling of mutual influence

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>. The basic chemical properties of the soil have been determined in an accredited testing laboratory at the Federal State Budgetary Institution “Arkhangelskaya” Agrochemical Service Station.

For citation: Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Volkov A.G., Bogdanov A.P., Bun'kov N.A. The Influence of Soil Properties in Discrete Mounds on the Growth of Norway Spruce (*Picea abies* L. Karst) Seedlings. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 60–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-60-76>

Введение

Технологии лесовосстановления в условиях северного региона рассматривались с различных точек зрения: применение разных технологических приемов в дифференцированных лесорастительных условиях, влияние способов создания лесных культур и видов посадочного материала на рост сеянцев и саженцев [1, 5, 10, 11, 16]. Признано, что особое внимание при закладке лесных культур необходимо уделять обработке почвы, обеспечивая высокий уровень агротехнического фона в посадочных местах [9]. Влияние обработки почвы сказывается на росте культур в 1-е десятилетия [1, 2, 8, 10].

Обработка почвы при лесохозяйственном освоении участка считается запланированным экологическим нарушением [21], но при ее проведении можно добиться оптимальных свойств почвы или, наоборот, ухудшить их [10, 40]. Приоритетным считается максимальное использование естественного плодородия и создание условий, соответствующих природной экосистеме [11]. Поэтому одним из важнейших мероприятий становится оценка агрохимических свойств почв [8, 42], что подводит к междисциплинарным исследованиям и признается тенденциями будущего в лесовосстановлении [35, 37]. Изменение агрохимических свойств почв при обработке, их связь с ростом посаженных растений, динамика сукцессионных сдвигов в процессе восстановления экосистемы [5, 41] являются приоритетными при выборе лесокультурных технологий.

При обработке почвы меняются многие свойства, которые определяют рост растений, важно установить причинно-следственную связь в разных лесорастительных условиях и при разных технологиях воздействия в процессе создания лесных культур [33]. Способы обработки почвы, влияя на качество

посадочных мест, определяют количественные взаимосвязи между условиями произрастания, выживаемостью и ростом сеянцев [29].

При оценке обработки почвы следует применять комплекс приемов, включая анализ строения, гранулометрии, водно-физических и агрохимических показателей [5, 10, 15, 22, 27]. Изменение свойств почвы прямо и косвенно влияет на растения – через поддержание биогеохимических циклов, формирование растительных и микробных сообществ [19, 20]. По мнению Л.О. Карпачевского [7], рост сосны и ели на 70 и 90 % соответственно определяется именно почвенными факторами.

Не все почвенные свойства влияют на адаптацию сеянцев в посадочных местах равнозначно. Содержание влаги и водный баланс почв разного строения и гранулометрического состава являются в этом случае определяющими и действующими в большей степени, чем наличие питательных веществ, на приживаемость и рост растений, обеспечивая доступность питательных веществ [3, 26, 28, 38]. При различных способах обработки почвы нередко физические свойства (сложение, порозность) оказывались более значимы для роста растений, чем химические, в т. ч. содержание питательных веществ [5]. Именно эти свойства обеспечивают насыщение почвы водой и кислородом, поддерживают биогеохимические циклы, доступность питательных веществ и фотосинтезирующую деятельность растительности.

При оценке почвы в ходе высадки лесных культур с применением технологий предварительной обработки и созданием посадочных мест, в т. ч. дискретных, в различных лесорастительных условиях необходимо рассматривать комплекс почвенных свойств, учитывая при этом исходные природные условия местообитаний и приобретенные под влиянием технологических приемов. Разные технологические приемы (рыхление, оборот пласта, создание микроповышений и др.) обуславливают разницу в строении и свойствах посадочного места, которые со временем эволюционируют, но на определенном этапе изучения, по крайней мере до 5–6-летнего возраста культур, в период свободного стояния растений [5], служат основанием для подбора способов обработки при планировании лесохозяйственных мероприятий.

Цель нашего исследования – выявление закономерности влияния комплекса водно-физических и агрохимических свойств почвы на рост и развитие ели обыкновенной, отбор наиболее значимых почвенных факторов для обеспечения ее роста в 5-летних культурах, созданных по дискретным экскаваторным микроповышениям на вырубке черничного типа леса для экологического управления процессом искусственного лесовосстановления.

Объекты и методы исследования

Исследование проводили в 2023 г. в 5-летних культурах (биологический возраст ели 7 лет) в черничном типе условий произрастания в Вилегодском лесничестве Архангельской области (Двинско-Вычегодский таежный район). До сплошной рубки в 2017 г. на месте лесокультурной площади произрастало насаждение со следующими таксационными характеристиками: состав древостоя – 4Е1С3ОС2Б, класс возраста – 7, полнота – 0,7, высота – 19 м, диаметр – 20 см, запас древесины – 270 м³/га, тип леса – ельник черничный, класс бонитета – IV. Рельеф – равнинный с перепадами высот 1–3 м. Почва мелкоподзолистая

иллювиально-железистая супесчаная на среднем суглинке. Из-за отсутствия достаточного количества подроста ели (0,5 тыс. шт./га) весной 2019 г. была произведена механизированная обработка почвы экскаватором Hitachi ZX 180 LC непосредственно перед посадкой. Обработка почвы осуществлялась методом нерядового дискретного создания микроповышений (насыпей) через 1,0–1,5 м. Экскаватор формировал микроповышения шириной в среднем 1,0 м (от 0,6 до 1,1 м) и длиной 1,1 м (от 0,8 до 1,4 м). Приподнятые посадочные места на 10–35 см состояли из перевернутого слоя лесной подстилки, расположенной на нижележащей неповрежденной лесной подстилке, и были покрыты минеральной почвой. Для посадки использовали стандартный 2-летний районированный посадочный материал ели обыкновенной с закрытой корневой системой. При посадке количество сеянцев было не менее 2 тыс. шт./га. На одно микроповышение высаживали 2–3 сеянца: в центр, в край от ямы и в край у ямы, образующейся при подготовке посадочного места.

На пробных площадях провели детальную оценку состояния и роста изучаемых культур и подроста ели последующей генерации (пасака), у которых измерили следующие биометрические показатели: а) надземную часть, в т. ч. высоту – от поверхности почвы до верхушечной почки (см), прирост по высоте (см), а также диаметр стволика на уровне поверхности почвы (см); б) подземную часть – ширину и длину развития корневой системы. У сеянцев отмечали места посадки в микроповышения: в центр, в край от ямы и в край у ямы. На лесокультурной площади всего было измерено 60 сеянцев в различных местах микроповышения и 40 экземпляров близкого по возрасту подроста ели.

В местах произрастания сеянцев в изучаемых культурах и подроста ели в пределах корнеобитаемого слоя взяли образцы почвы для оценки ее свойств с использованием устоявшихся в лесном почвоведении методов [13]. Образцы почвы отбирали с помощью металлического цилиндра с режущими краями (бура) объемом 52,78 см³ (диаметр – 4,1 см, длина – 4 см).

В лабораторных условиях образцы почвы взвесили (с точностью до 0,01 г) и высушили при температуре 105 °С до постоянной массы. Далее установили основные физические свойства почвы: 1) полевую влажность; 2) плотность сложения; 3) плотность твердой фазы пикнометрически; 4) общую пористость; 5) пористость аэрации [12]. pH_{KCl} солевой вытяжки определяли в соответствии с ГОСТ 26483–85, массовую долю органического вещества (C) – ГОСТ 26213–2021 п. 6.1, массовую долю подвижных форм калия (K₂O) и фосфора (P₂O₅) – ГОСТ Р 54650–2011, а общий азот (N) – ГОСТ Р 58596–2019 п. 7.1.

Для анализа данных применяли методы многомерной статистики. Различия в биометрических показателях культур на разных микросайтах и подроста ели, а также влияние на них почвенных свойств устанавливали с помощью метода прямой (ограниченной) ординации RDA [30]. Он представляет собой прямое расширение множественной регрессии для моделирования данных с многомерным откликом (биометрические показатели деревьев). Результатом является сжатое пространство признаков с осями, обусловленными (взвешенными) независимыми (почвенными) переменными. Такие оси объясняют вариацию зависимой матрицы откликов от матрицы предикторов [18]. Перед анализом данные стандартизовались.

Статистическую значимость различий между участками по биометрическим показателям роста деревьев определяли с помощью дисперсионного

анализа, основанного на матрице сходства деревьев [17, 36]. В качестве меры различий использовали расстояние Эвклида. Значение p получали посредством перестановочного теста [34]. Анализ проводили в среде r [43]. Применяли пакеты: *vegan* [39], *ggplot2* [44].

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнение показателей роста близкой по возрасту ели естественного происхождения (пасека) и высаженных в различные сайты посадочного места, подготовленного экскаватором, 2-летних сеянцев с закрытой корневой системой показало их заметное отличие ($R^2 = 0,18$; $p = 0,009$). Аналогичные результаты дал и подобный эксперимент, выполненный шведскими учеными [23].

Подрост ели по всем замеренным биометрическим показателям превосходит лесные культуры (рис. 1). Для него характерен линейный среднегодовой прирост 10,5 см, что обеспечивает среднюю высоту экземпляров 55 см, и хорошее развитие корневой системы, как главного, так и боковых разветвлений.

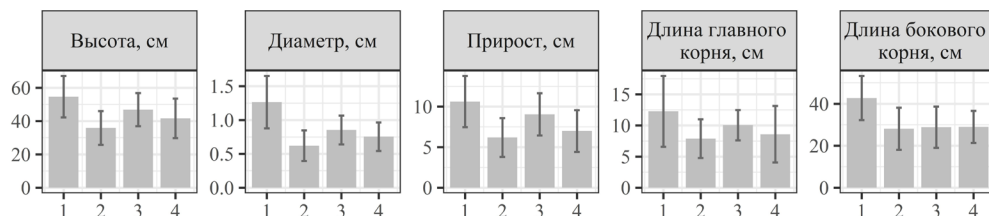


Рис. 1. Биометрические показатели культур и подроста ели на микросайтах:

- 1 – пасека; 2 – край микроповышения у ямы; 3 – центр микроповышения;
4 – край микроповышения от ямы. Среднее значение \pm стандартное отклонение

Fig. 1. The biometric indicators of spruce crops and undergrowth in microsites:

- 1 – cutting strip; 2 – edge of the mound near the hole; 3 – centre of the mound;
4 – edge of the mound away from the hole. Mean value \pm standard deviation

Рост ели в культурах, несмотря на обработку почвы, снижен во всех микросайтах посадочного места, что связано с «послепосадочным стрессом», который может продолжаться несколько лет [11] и зависит от разложения комка субстрата и выхода корневой системы за его пределы. Это хорошо демонстрирует рис. 1: и длина главного корня, и длина боковых корней ели в культурах ниже, чем на пасеке.

При решении вопроса о расположении сеянца в посадочном месте важно учитывать факторы, обеспечивающие лучший рост по отношению к естественным условиям. В разных местах одного микроповышения рост ели отличается, и хорошо заметно, что он активнее в центре, чем по краям. Это связано с переслоенностью почвы в разных местах микроповышения. Ранее [6] было установлено, что в центре микроповышения создаются более выровненные условия строения турбированной экскаватором толщи, чем по краям. В центре микроповышения почва чаще представлена легкими и средними суглинками срединных и нижних горизонтов. Тогда как для краев микроповышений характерна превосходящая изменчивость почвы по составу за счет перемешанности горизонтов и большего участия в толще легкого по гранулометрическому составу неплодородного подзолистого горизонта. В подобных опытах шведских ученых [23] также были отмечены различия в росте сеян-

цев, высаженных в центре и по краям значительного по размерам посадочного места. Они связывают различия в росте с наличием прослоек органики и минеральной почвы.

Заметно (см. рис. 1), что у сеянцев в разных частях посадочного места нет различий лишь по скорости выхода боковых корней из субстратного кома, что, вероятно, связано с явлением хемотропизма. Видимо, в это период развития сеянцев и разложения субстрата различия в почвенных условиях в разных сайтах не обеспечивают превалирования по сравнению с почвенными условиями торфяного субстрата.

По комплексу биометрических показателей сеянцы ели, произрастающие в центре микроповышения, более похожи на подрост пасеки, чем сеянцы, находящиеся по его краям (рис. 2). При этом различия все же являются статистически значимыми ($R^2 = 0,20$; $p = 0,002$). Попарное сравнение показывает, что наибольший вклад в различия сеянцев в центре микроповышения и на пасеке вносит длина бокового корня, которая определяет около 42 % различий признаков в сравниваемой паре (табл. 1). По другим изученным признакам (рост, прирост, диаметр стволика, длина главного корня) различия не доказаны, что предполагает влияние на рост сеянцев в центре микроповышения условий, обеспеченных комплексом почвенных свойств, складывающихся при обработке.

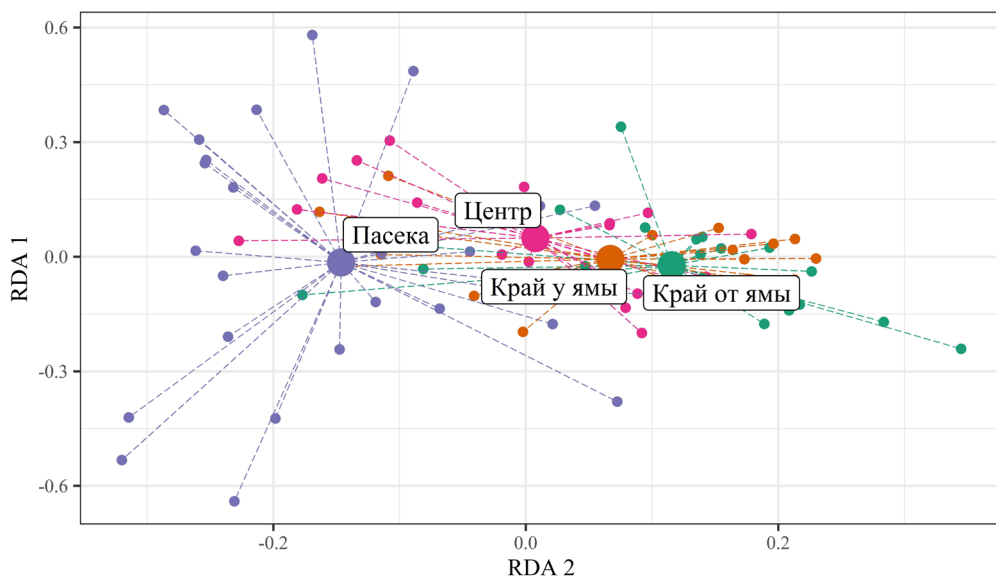


Рис. 2. Результаты прямой ординации деревьев на разных микросайтах в пространстве первых 2 осей (RDA 1 и RDA 2)

Fig. 2. The results of direct ordination of trees on different microsites in the space of the first 2 axes (RDA 1 and RDA 2)

Парное сравнение кластера подростка с сеянцами, произрастающими на краях посадочного места (у ямы, от ямы), показывает существенное отличие по всем биометрическим признакам. Наибольший вклад в различия между этими парами вносит линейный рост (высота) – 40 %. У подростка средний прирост по высоте на 31–54 % больше, чем у сеянцев на краях микроповышений. Можно предположить, что влияние оказывают различия в водном режиме, связанном

со строением почвенной толщи в краевых сайтах, где она насыщена легким по гранулометрическому составу подзолистым горизонтом. При возможном летнем подсыхании верхних слоев почвы в посадочном месте снижается доступность питательных веществ и рост растений [15, 28]. При этом затормаживается разложение торфяного кома субстрата, что не только уменьшает обеспечение растений азотом, а следовательно, и рост [24], но также способствует закреплению боковых корней в коме [11].

Таблица 1

Вклад независимых переменных в различия сеянцев ели, произрастающих на разных микросайтах
The contribution of independent variables to differences in spruce seedlings growing in different microsites

Признак	Стандартное отклонение	Отношение	Накопленная степень различий	p
<i>Пасека – Край у ямы (R² = 0,36; p = 0,001)</i>				
Высота, см	0,069	1,52	0,43	0,001***
Длина боковых корней, см	0,065	1,33	0,77	0,001***
Длина главного корня, см	0,025	1,09	0,88	0,036*
Прирост, см	0,018	1,43	0,99	0,001***
Диаметр, см	0,002	1,59	1,00	0,001***
<i>Пасека – Край от ямы (R² = 0,31; p = 0,002)</i>				
Высота, см	0,057	1,52	0,40	*
Длина боковых корней, см	0,049	1,53	0,75	0,079.
Длина главного корня, см	0,024	1,24	0,89	0,002**
Прирост, см	0,015	1,49	0,99	0,013*
Диаметр, см	0,002	1,36	1,00	0,001***
<i>Пасека – Центр микроповышений (R² = 0,20; p = 0,002)</i>				
Длина боковых корней, см	0,050	1,53	0,42	0,053
Высота, см	0,045	1,48	0,79	0,987
Длина главного корня, см	0,020	0,98	0,90	0,951
Прирост, см	0,012	1,33	0,99	0,979
Диаметр, см	0,002	1,29	1,00	0,257
<i>Центр микроповышений – Край у ямы (R² = 0,11; p = 0,014)</i>				
Высота, см	0,063	1,34	0,44	0,212
Длина боковых корней, см	0,049	1,32	0,77	0,665
Прирост, см	0,016	1,34	0,89	0,073
Длина главного корня, см	0,014	1,41	0,99	0,890
Диаметр, см	0,001	1,56	1,00	0,890
<i>Центр микроповышений – Край от ямы (R² = 0,07; p = 0,050)</i>				
Высота, см	0,047	1,52	0,42	0,855
Длина боковых корней, см	0,037	1,46	0,74	0,995
Длина главного корня, см	0,014	1,81	0,88	0,333
Прирост, см	0,013	1,43	0,99	0,681
Диаметр, см	0,001	1,38	1,00	1,000

Окончание табл. 1

Признак	Стандартное отклонение	Отношение	Накопленная степень различий	p
<i>Край от ямы – Край у ямы ($R^2 = 0,01$; $p = 0,279$)</i>				
Высота, см	0,057	1,36	0,43	0,558
Длина боковых корней, см	0,050	1,23	0,77	0,833
Длина главного корня, см	0,018	1,33	0,90	0,448
Прирост, см	0,013	1,28	0,99	0,960
Диаметр, см	0,001	1,48	1,00	0,991

Примечание: Полу жирным шрифтом выделены достоверные различия. Уровень значимости: *** – 0; ** – 0,001; * – 0,01; . – 0,05.

По комплексу ростовых показателей различия между кластерами сеянцев в центре посадочного места и по его краям подтверждаются лишь на уровне статистической тенденции ($R^2 = 0,07$; $p = 0,050$; $R^2 = 0,01$; $p = 0,279$). В то же время сенцы ели в центре микроповышения на 21–22 % превосходят в росте сеянцы по краям, но при этом разница в среднем приросте за 3 года незначительна.

Попарное сравнение позволяет выделить группу биометрических показателей из числа использованных при наблюдении, наиболее отзывчивых на различия условий произрастания, вносящих преобладающий вклад в различия между кластерами. Прежде всего в число таких показателей входят высота растения, связанная с приростом (по крайней мере за последние 3 года), а также длина боковых корней. Во всех случаях попарного сравнения диаметр стволика у шейки корня не вносит существенного вклада в различия подроста и культур на микро-сайтах, несмотря на различия, проявляющиеся в абсолютных единицах (диаметр подроста ели на 21–45 % выше, чем диаметр культур в микроповышениях).

Водно-физические и агрохимические свойства почвы в посадочном месте зависят от исходной почвы и определяются степенью ее перемешанности и строением турбированных горизонтов. В подзолистых почвах на тяжелых породах вклад в свойства почвы в посадочных местах будут вносить и верхние легкие горизонты (подзолистый), и более тяжелые срединные и нижние (почвообразующая порода), которые на мелких северных почвах может захватывать ковш экскаватора. Окажет влияние и технология подготовки посадочного места (переворот слоев почвы, уплотнение головкой ковша и т. п.). Легко определяемым и удобным для статистических расчетов показателем служит высота сложения посадочного места относительно уровня пашки. Так, в нашем случае в центре микроповышения она составляла 21,9 см (с колебаниями от 12 до 32 см), на краю от ямы – 27,9 см (от 12 до 45 см), на краю у ямы – 19,1 см (от 10 до 30 см). Оседание холма с течением времени считается потенциальной причиной снижения роста растений [25]. Оптимальная высота насыпи составляет 5–10 см в высоту на почвах с мелкой текстурой и 15–20 см в высоту на почвах со средней [31].

По микросайтам в пределах посадочного места различия незначительны по всем показателям водно-физических и агрохимических свойств. Так, плотность твердой фазы колеблется от 2,04 до 2,08 г/см³, пористость – от 34,6 до 37,3 %, пористость аэрации – от 11,5 до 13,2 % (рис. 3). В то же время заметно сниженное содержание влаги в момент исследования (сентябрь) в центре посадочного места (на 8 %) по сравнению с его краями. Считается, что через

2–3 года после обработки почвы под лесные культуры различия между водно-физическими и агрохимическими свойствами сглаживаются за счет эволюции биогеоценоза [7].

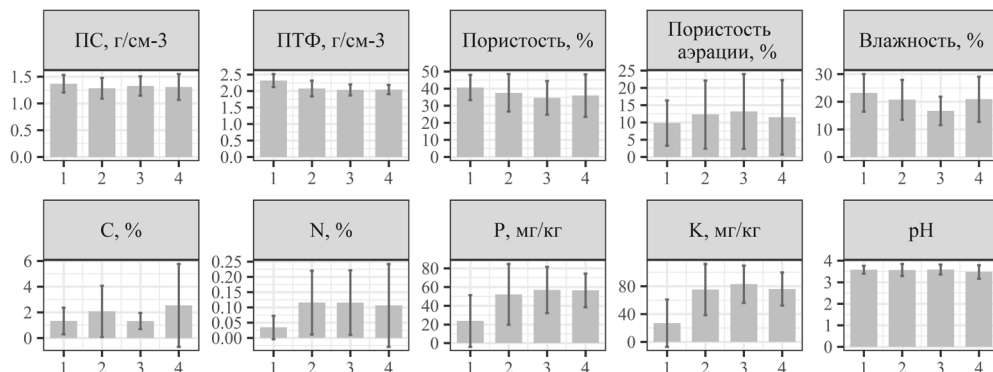


Рис. 3. Водно-физические и агрохимические свойства почвы на микросайтах:

1 – пасека; 2 – край микроповышения у ямы; 3 – центр микроповышения; 4 – край микроповышения от ямы (ПС – плотность сложения; ПТФ – плотность твердой фазы). Среднее значение \pm стандартное отклонение

Fig. 3. The water-physical and agrochemical soil properties in microsites:

1 – cutting strip; 2 – edge of the mound near the hole; 3 – centre of the mound; 4 – edge of the mound away from the hole (ПС – density of soil structure; ПТФ – solid body density). Mean \pm standard deviation

В целом для нативной необработанной почвы пасеки характерна меньшая изменчивость признаков. Различия по водно-физическим свойствам почвы на пасеке проявляются в большей влажности (23,1 %) и меньшей скважности аэрации (11,8 %), а также в повышенной плотности твердой фазы почвы (2,31 г/см³) по сравнению с обработанной почвой, где в снижение плотности вносит вклад примесь органики лесной подстилки.

При сравнении почвенных свойств разных сайтов посадочного места с пасекой установлены существенные различия: для центра посадочного места – по высоте отсыпанной толщи, влажности и плотности сложения; для посадочных мест на краю (от ямы) – по высоте отсыпанной толщи и плотности сложения. В обоих случаях существенно значимы различия по содержанию калия и фосфора в корнеобитаемой толще. Наибольшее число значимо отличающихся от пасеки показателей установлено для посадочного места на краю ямы. Значимо отличаются все изученные показатели, кроме пористости аэрации и массовой доли общего азота.

Кислые и бедные питательными веществами подзолистые почвы на пасеке по своим агрохимическим свойствам являются типичными для региона, но их обработка может усиливать биохимические процессы. Все агрохимические показатели в корнеобитаемом слое пасеки ниже, чем в микроповышениях. Так, доля органического вещества составляет 1,44 %, доля азота – 0,061 %, подвижных форм фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) – 36,6 и 33,7 мг/кг соответственно. При этом как нативная, так и обработанная почва остаются кислыми, $pH_{KCl} = 3,5$ –3, 6.

Предикторами усиления биологического круговорота и повышения качества почв в первую очередь будут доступ кислорода и привнос органики при турбировании, как в результате примешивания к минеральной части, так и при образовании двойного слоя лесной подстилки при обороте пласта верхнего

слоя почвы экскаватором. Считается, что такие микроповышения активизируют выработку азота [32] за счет разложения добавленной при формировании посадочного места органики. Именно органическое вещество при разложении обеспечивает почву азотом и элементами питания, стимулирующими рост растений [4].

В нашем случае повышение содержания подвижных калия и фосфора в корнеобитаемом слое посадочного места значимо отличается от почвы на пасеке. Различия по органическому углероду доказаны в парах пасека–сайт у ямы и пасека–центр (на уровне тенденции). Однако по расположению растений в пределах посадочного места, подготовленного экскаватором, различия несущественны: общий азот изменяется в диапазоне 0,106–0,116 %, содержание подвижных форм фосфора – 52,1–56,9 мг/кг, подвижных форм калия – 75,3–83,0 мг/кг. Наиболее значительно варьирует в пределах посадочного места доля органического вещества и общего азота (1,33–2,54 и 0,106–0,116 % соответственно). При этом наименьшее содержание органического углерода отмечено в центре посадочного места в совокупности с повышенным содержанием там элементов питания. К этому приводит разложение органики в условиях водно-физических свойств почвы в центре посадочного места, о которых упоминалось выше: снижение влажности и повышение доступа воздуха/кислорода для обеспечения биохимических процессов.

Водно-физические и агрохимические факторы связаны между собой, действуют и прямо, и косвенно, важно выделить наиболее репрезентативные, значимо влияющие на рост растений. Это может быть ограниченное число факторов [5, 7], характерное для конкретных лесорастительных условий.

При наличии большого числа разнонаправленных показателей использовали анализ с многомерным откликом, который позволяет определить комбинации предикторов, объясняющих максимальную изменчивость переменных показателей. Модель множественной регрессии на моделирование данных с многомерным откликом является статистически значимой ($F = 4,7445$; $p = 0,0001$).

Анализ избыточности (RDA) показал, что почвенные свойства обуславливают до 36 % дисперсии биометрических параметров ели, из них 32 % приходятся на 1-ю ось (RDA 1). Неучтенные факторы, которые, вероятно, относятся к абиотическим, объясняют 64 % вариативности биометрии саженцев, с долей 1-й оси PC1 равной 41 %.

Селекция модели RDA с помощью информационного критерия (AIC) и коэффициентов детерминации (R^2) позволила нам выявить почвенные факторы, с наибольшей силой воздействующие на рост ели (табл. 2). В их роли выступают водно-физические свойства почвы (пористость, влажность, плотность твердой фазы) и высота насыпи. Вместе они описывают 34 % изменчивости сеянцев ели (модель № 5), что на 2 % меньше, чем модель № 1. Она хоть и включает в себя агрохимические свойства почв, но влияние их настолько мало, что снижает приведенный коэффициент детерминации, штрафующий модель за введение предикторов, слабо увеличивающих ее мощность, до 0,28. Априори можно также признать значимыми для обеспечения биологического роста ели в данных условиях произрастания плотность сложения почвы и пористость аэрации, исключенных, однако, из модели по причине их высокой корреляции с рассматриваемыми свойствами почвы (VIF равен 75 и 36 соответственно).

Таблица 2

Статистические характеристики моделей RDA
The statistical characteristics of RDA models

Число переменных	Коэффициент детерминации		Псевдокритерий AIC	Псевдо-F-статистика	
	Обычный	Приведенный		F	Pr (>F)
Модель 1: $Y \sim \text{ПТФ} + \text{П} + \text{ВН} + W + \text{C} + \text{N} + \text{P} + \text{K} + \text{pH}$					
9	0,36	0,28	119,06	4,74	0,0001
Модель 2: $Y \sim \text{ВН}$					
1	0,23	0,22	119,40	24,49	0,0001
Модель 3: $Y \sim \text{ВН} + \text{П}$					
2	0,30	0,28	112,68	17,82	0,0001
Модель 4: $Y \sim \text{ВН} + \text{П} + W$					
3	0,31	0,29	112,39	12,79	0,0001
Модель 5: $Y \sim \text{ВН} + \text{П} + W + \text{ПТФ}$					
4	0,34	0,30	112,03	10,03	0,0001

Примечание: ПТФ – плотность твердой фазы, г/см³; П – пористость, %; W – влажность, %; ВН – высота насыпи, см; C – органический углерод, %; N – общий азот, %; P – фосфор, мг/кг; K – калий, мг/кг; pH – pH_{KCl}.

То есть агрохимические показатели стали факторами, в меньшей степени обеспечивающими рост ели в 5-летних культурах и близкого по возрасту подроста на пасеке. Подобный приоритет влияния на рост сеянцев хвойных пород в культурах был отмечен ранее [5] авторами, которые выделили 5 репрезентативных признаков, наиболее отражающих биологический рост, среди которых также превалировали водно-физические свойства: плотность сложения, пористость, пористость аэрации, влажность и содержание органического вещества. По мнению авторов, теснота корреляционной связи с названными показателями в 4-летник культурах на плужных пластах торфянисто-подзолистой почвы составляла 0,897.

Роль органического вещества и элементов питания почвы в обеспечении биологической составляющей роста хвойных пород в различных условиях произрастания отмечали и другие ученые [4, 7, 14, 15], имея в виду доступность и соотношение высвобождающихся при разложении органики химических элементов и оксидов. Однако успешность разложения органического вещества и доступность питательных веществ прямо и косвенно определяется комплексом водно-физических свойств почвы в корнеобитаемой толще, связанных с условиями местопроизрастания и обработкой почвы.

Визуализация направленности и силы влияния почвенных факторов на биометрические показатели роста ели в культурах и на пасеке в условиях черничного типа леса представлена на рис. 4. Хорошо заметна разнонаправленность векторов водно-физических свойств почвы и одного фактора, непосредственно связанного с обработкой почвы под лесные культуры – высоты насыпи в разных частях большого посадочного места, созданного экскаватором. Связь значимая и должна учитываться при создании лесных культур и решении вопроса о размещении сеянцев при посадке: при увеличении высоты насыпи посадочного места рост сеянцев снижается.

Если оценить векторность почвенных показателей пасеки и посадочных мест, то визуализация модели отражает лучшие водно-физические условия

в корнеобитаемом слое ели для пасеки. Расположение пасеки в пространстве осей RDA показывает оптимум почвенных свойств для произрастания семян ели. По мере удаления от него продуктивность ели снижается. Это происходит с увеличением высоты насыпи, уменьшением влажности, пористости (пористости аэрации) и плотности твердой фазы, а также плотности сложения. Ближе всего к этим условиям условия произрастания, которые создаются в центре посадочного места. Изученные 5 агрохимических показателей лучше в посадочном месте, но различия сглажены и не обеспечивают дифференциации роста растений на разных сайтах. В данном возрасте культур влияние агрохимических свойств почвы практически не проявилось и доказано не было.

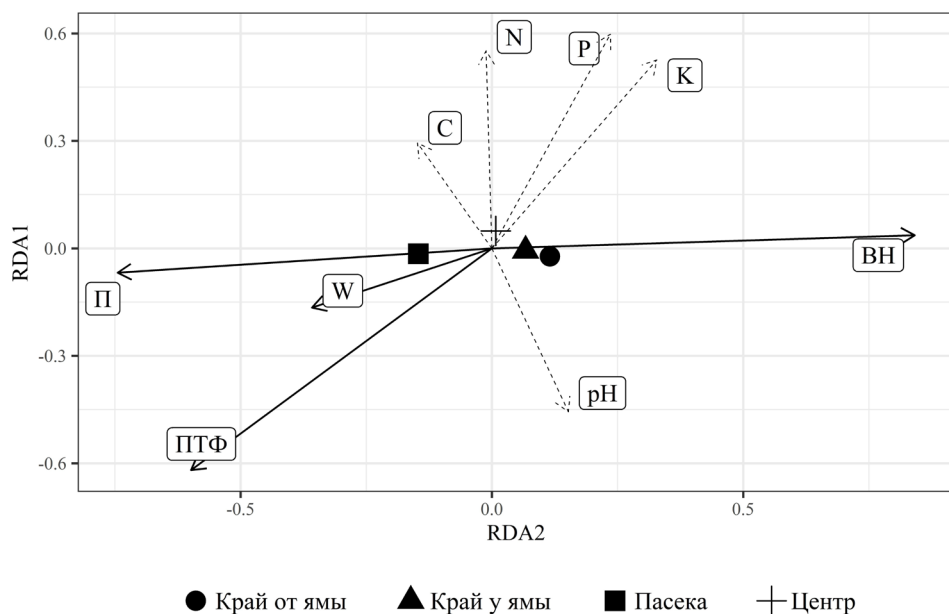


Рис. 4. Влияние почвенных свойств на рост деревьев на разных микросайтах в пространстве первых 2 осей прямой ординации (RDA 1 и RDA 2).

Стрелками указаны векторы. Условные обозначения – см. табл. 2

Fig. 4. The influence of soil properties on tree growth in different microsites in the space of the first 2 axes of direct ordination (RDA 1 and RDA 2). The arrows indicate the vectors. For the legend see Table 2

Заключение

Проведенные расчеты с использованием многомерного анализа (RDA) позволили на примере 5-летних культур ели обыкновенной, созданных в черничном типе леса на подзолистой почве (Вилегодский район Архангельской области), выявить и оценить влияние почвенных свойств на рост семян, высаженных в различные части большого посадочного места, созданного экскаватором. Результаты сопоставлены с ростом близкого по возрасту подроста последующей генерации на пасеке, также определено наиболее подходящее размещение семян при используемой технологии обработки почвы.

Наиболее отзывчивыми на различия условий произрастания являются высота растения, связанная с приростом (по крайней мере за последние 3 года), а также длина боковых корней. Диаметр стволика у шейки корня не вносит су-

щественного вклада в различия подроста и культур на микросайтах, несмотря на несходство, проявляющееся в абсолютных единицах.

Установлено, что ростовые параметры ели в 1-е годы жизни обеспечиваются прежде всего водно-физические свойства, такие как пористость, плотность твердой фазы, влажность, а также тесно связанные с ними плотность сложения и пористость аэрации. В то же время из агрохимических свойств значимыми оказались только содержание калия и фосфора (на уровне тенденции), что ставит вопрос о внесении калийных и фосфорных удобрений при посадке сеянцев. При дискретной обработке почвы с подготовкой микроповышений большое значение для роста высаженных сеянцев имеет высота насыпи, образующейся при обработке почвы. Вклад высоты отсыпанного микроповышения может перекрывать значение агротехнических параметров, связанных с обеспечением водно-физических и химических свойств почвы. Этот показатель связан с качеством работы оператора, проводящего обработку почвы.

Микроповышения, подготовленные экскаватором, по сравнению с пасекой обеспечивают лучший питательный режим в корнеобитаемом слое, но обладают повышенной рыхлостью и сниженной влажностью почвы, что может влиять на рост сеянцев. По комплексу свойств наиболее благоприятные условия для сеянцев ели, самые близкие к нативным условиям без обработки почвы, создаются в центральной части посадочного места. Это необходимо учитывать при получении лесных культур в ходе обработки почвы крупными микроповышениями.

В практическом отношении полученные результаты будут также полезны при прогнозировании роста посадочного материала в случае использования сходных технологий посредством экспресс-методов почвенных исследований, откроют перспективы дальнейших исследований по моделированию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Сунгуров Р.В., Сунгурова Н.Р. Лесные культуры в северной подзоне тайги: моногр. Архангельск: Соломбал. тип., 2006. 144 с.
Babich N.A., Sungurov R.V., Sungurova N.R. *Forest Crops in the Northern Taiga Subzone*: Monograph. Arkhangelsk, Solombala Print. House, 2006. 144 p. (In Russ.).
2. Багаев С.С. Оценка состояния опытно-производственных культур ели, заложённых по разным технологиям // Лесохоз. информ. 2016. № 3. С. 123–137.
Bagaev S.S. Assessment of the Development of Industrial Spruce Crops Laid on Different Technologies. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2016, no. 3, pp. 123–137. (In Russ.).
3. Бартнев И.М. К вопросу создания лесных культур посадкой ПЗМК // Лесотехн. журн. 2013. № 2(10). С. 123–130.
Bartenev I.M. On the Issue of Creating Forest Crops by Planting Seedlings with a Closed Root System. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2013, no. 2(10), pp. 123–130. (In Russ.).
4. Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с.
Bobkova K.S., Mashika A.V., Smagin A.V. *Dynamics of Organic Matter Carbon Content in Middle Taiga Spruce Forests on Automorphic Soils*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2014. 270 p. (In Russ.).
5. Варфоломеев Л.А., Сунгуров Р.В. Почвенная экология лесных культур на Севере. Архангельск: СевНИИЛХ, 2007. 292 с.

Varfolomeev L.A., Sungurov R.V. *Soil Ecology of Forest Crops in the North*. Arkhangelsk, Northern Research Institute of Forestry Publ., 2007. 292 p. (In Russ.).

6. Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н., Богданов А.П., Парамонов А.А. Опыт создания лесных культур на микроповышениях при экскаваторной обработке почвы // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 2. С. 5–16.

Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Bogdanov A.P., Paramonov A.A. Forest Crops at Spot Mounds after Excavator Soil Cultivation. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 5–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2024-2-5-16>

7. Карпачевский Л.О. Лес и лесные почвы. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 264 с.

Karpachevskij L.O. *Forest and Forest Soils*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 264 p. (In Russ.).

8. Касимов А.К., Итешина Н.М., Моличева Т.О. Агрохимические свойства посадочных мест в условиях механической обработки почвы на еловых вырубках Удмуртской республики // Аграрн. вестн. Урала. 2009. № 5(59). С. 89–92.

Kasimov A.K., Iteshina N.M., Molicheva T.O. Agrochemical Properties of Planting Sites in Conditions of Mechanical Tillage in Spruce Clearings of the Udmurt Republic. *Agrarnyj vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals, 2009, no. 5(59), pp. 89–92. (In Russ.).

9. Мерзленко М.Д. Актуальные аспекты искусственного лесовосстановления // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 22–30.

Merzlenko M.D. Relevant Aspects of Artificial Reforestation. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 3, pp. 22–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.22>

10. Мерзленко М.Д., Бабич Н.А. Теория и практика выращивания сосны и ели в культурах. Архангельск: АГТУ, 2002. 220 с.

Merzlenko M.D., Babich N.A. *Theory and Practice of Growing Pine and Spruce in Crops*. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2002. 220 p. (In Russ.).

11. Мочалов Б.А. Подготовка почвы и выбор посадочного места при создании лесных культур сосны из семян с закрытыми корнями // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 4. С. 9–18.

Mochalov B.A. Soil Cultivation and Selection Planting Site Attached to Pine Artificial Stands Creation from Containerized Seedlings. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2014, no. 4, pp. 9–18. (In Russ.).

12. Наквасина Е.Н., Любова С.В. Почвоведение. Архангельск: САФУ, 2016. 146 с.

Nakvasina E.N., Lyubova S.V. *Soil Science*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2016. 146 p. (In Russ.).

13. Наквасина Е.Н., Серый В.С., Семенов Б.А. Полевой практикум по почвоведению. Архангельск: АГТУ, 2007. 127 с.

Nakvasina E.N., Seryj V.S., Semenov B.A. *Field Workshop on Soil Science*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 127 p. (In Russ.).

14. Придача В.Б., Позднякова С.В., Сазонова Т.А. Влияние соотношений N : P : K в среде на минеральный состав растений рода *Betula* // Тр. КарНЦ РАН. 2012. № 2. С. 104–112.

Pridacha V.B., Pozdnyakova S.V., Sazonova T.A. Effect of Ambient N : P : K Ratios on the Mineral Nutrient Composition in *Betula* Plants. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk* = Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2012, no. 2, pp. 104–112. (In Russ.).

15. Сазонова Т.А., Придача В.Б. Влияние почвенных условий среднетаежного сосняка лишайникового на рост и показатели минерального и водного режима сосны обыкновенной // Тр. КарНЦ РАН. 2020. № 11. С. 113–123.

Sazonova T.A., Pridacha V.B. The Effect of Soil Conditions on Growth and Parameters of the Mineral and Water Metabolism in Scots Pine in a Middle-Taiga Lichen-Type Pine Forest. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk* = Transactions of

the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2020, no. 11, pp. 113–123. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb1316>

16. Сунгурова Н.Р., Сунгуров Р.В., Гаевский Н.П. Анализ эффективности искусственного лесовосстановления и предложения по его улучшению // Уч. зап. ПетргГУ. 2014. Т. 1, № 8(145). С. 71–76.

Sungurova N.R., Sungurov R.V., Gaevskiy N.P. Analysis of Artificial Reforestation Efficiency and Suggestions on its Improvement. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* = Proceedings of Petrozavodsk State University, 2014, vol. 1, no. 8(145), pp. 71–76. (In Russ.).

17. Anderson M.J. A New Method for Non-Parametric Multivariate Analysis of Variance. *Austral Ecology*, 2001, vol. 26, iss. 1, pp. 32–46.

<https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x>

18. Borcard D., Gillet F., Legendre P. *Numerical Ecology with R*: 2nd ed. New York, Springer Cham, 2018. 435 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71404-2>

19. Bowd E.J., Banks S.C., Strong C.L., Lindenmayer D.B. Long-Term Impacts of Wildfire and Logging on Forest Soils. *Nature Geoscience*, 2019, vol. 12, pp. 113–118.

<https://doi.org/10.1038/s41561-018-0294-2>

20. Cambi M., Hoshika Y., Mariotti B., Paoletti E., Picchio R., Venanzi R., Marchi E. Compaction by a Forest Machine Affects Soil Quality and *Quercus robur* L. Seedling Performance in an Experimental Field. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 384, pp. 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.045>

21. Chaves Cardoso J., Burton P.J., Elkin C.M. A Disturbance Ecology Perspective on Silvicultural Site Preparation. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 12, art. no. 1278.

<https://doi.org/10.3390/f11121278>

22. Ding D., Arif M., Liu M., Li J., Hu X., Geng Q., Yin F., Li C. Plant-Soil Interactions and C:N:P Stoichiometric Homeostasis of Plant Organs in Riparian Plantation. *Frontiers in Plant Science*, 2022, vol. 13, art. no. 979023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.979023>

23. Häggström B., Hajek J., Nordin A., Öhlund J. Effects of Planting Position, Seedling Size, and Organic Nitrogen Fertilization on the Establishment of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) Seedlings. *Forests*, 2024, vol. 15, no. 4, art. no. 703. <https://doi.org/10.3390/f15040703>

24. Heiskanen J., Rikala R. Root Growth and Nutrient Uptake of Norway Spruce Container Seedlings Planted in Mounded Boreal Forest Soil. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 222, iss. 1–3, pp. 410–417. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.047>

25. Heiskanen J., Saksa T., Luoranen J. Soil Preparation Method Affects Outplanting Success of Norway Spruce Container Seedlings on Till Soils Susceptible to Frost Heave. *Silva Fennica*, 2013, vol. 47, no. 1, art. no. 893. <https://doi.org/10.14214/sf.893>

26. Holmström E., Gålnander H., Petersson M. Within-Site Variation in Seedling Survival in Norway Spruce Plantations. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 2, art. no. 181.

<https://doi.org/10.3390/f10020181>

27. Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Bogdanov A.P. Effects of Site Preparation Methods on Soil Physical Properties and Outplanting Success of Coniferous Seedlings in Boreal Forests. *Journal of Forestry Research*, 2024, vol. 35, art. no. 15.

<https://doi.org/10.1007/s11676-023-01671-w>

28. Ivanov Yu.V., Zlobin I.E., Kartashov A.V., Ivanova A.I., Ivanov V.P., Marchenko S.I., Nartov D.I., Kuznetsov V.V. Mineral Nutrition of Naturally Growing Scots Pine and Norway Spruce under Limited Water Supply. *Plants*, 2022, vol. 11, no. 19, art. no. 2652.

<https://doi.org/10.3390/plants11192652>

29. Knapp B.O., Wang G.G., Walker J.L. Relating the Survival and Growth of Planted Longleaf Pine Seedlings to Microsite Conditions Altered by Site Preparation Treatments. *Forest Ecology and Management*, 2008, vol. 255, iss. 11, pp. 3768–3777.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.013>

30. Legendre P., Legendre L. *Numerical Ecology*: Third English Edition. The Netherlands, Amsterdam, Elsevier, 2012. 990 p.
31. Lehtosalo M., Mäkelä A., Valkonen S. Regeneration and Tree Growth Dynamics of *Picea abies*, *Betula pendula* and *Betula pubescens* in Regeneration Areas Treated with Spot Mounding in Southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, vol. 25, iss. 3, pp. 213–223. <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.489514>
32. Liang M., Sugimoto A., Tei S., Bragin I.V., Takano S., Morozumi T., Shingubara R., Maximov T.C., Kiyashko S.I., Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V. Importance of Soil Moisture and N Availability to Larch Growth and Distribution in the Arctic Taiga-Tundra Boundary Ecosystem, Northeastern Siberia. *Polar Science*, 2014, vol. 8, iss. 4, pp. 327–341. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2014.07.008>
33. Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., Jacobs D.F. Mechanical Site Preparation for Forest Restoration. *New Forests*, 2012, vol. 43, pp. 825–848. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>
34. Manly B.F.J. *Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology*: 3rd Ed. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL, 2007. 455 p.
35. Mc Carthy R., Rytter L., Hjelm K. Effects of Soil Preparation Methods and Plant Types on the Establishment of Poplars on Forest Land. *Annals of Forest Science*, 2017, vol. 74, art. no. 47. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0647-9>
36. McArdle B.H., Anderson M.J. Fitting Multivariate Models to Community Data: A Comment on Distance-Based Redundancy Analysis. *Ecology*, 2001, vol. 82, iss. 1, pp. 290–297. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[0290:FMMTCD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[0290:FMMTCD]2.0.CO;2)
37. Nilsson U., Luoranen J., Kolström T., Örlander G., Puttonen P. Reforestation with Planting in Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, vol. 25, iss. 4, pp. 283–294. <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.498384>
38. Nzokou P., Cregg B.M. Morphology and Foliar Chemistry of Containerized *Abies fraseri* (Pursh) Poir. Seedlings as Affected by Water Availability and Nutrition. *Annals of Forest Science*, 2010, vol. 67, art. no. 602. <https://doi.org/10.1051/forest/2010015>
39. Oksanen J., Simpson G.L., Blanchet F.G., Kindt R., Legendre P., Minchin P., O'Hara R.B., Solymos P., Stevens M.H.H., Szoecs E., Wagner H., Barbour M., Bedward M., Bolker B., Borcard D., Borman T., Carvalho G., Chirico M., De Caceres M., Durand S., Antoniazzi Evangelista H.B., FitzJohn R., Friendly M., Furneaux B., Hannigan G., Hill M.O., Lahti L., Martino C., McGlinn D., Ouellette M.-H., Ribeiro Cunha E., Smith T., Stier A., Ter Braak C.J.F., Weedon J. *Vegan: Community Ecology Package*: R package version 2.6-10, 2025. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (accessed 01.02.25).
40. Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Switzerland, Springer Cham, 2013. 217 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4>
41. Perumal M., Wasli M.E., Ying H.S., Lat J., Sani H. Soil Morphological and Physicochemical Properties at Reforestation Sites after Enrichment Planting of *Shorea macrophylla* in Sampadi Forest Reserve, Sarawak, Malaysia. *Borneo Journal of Resource Science and Technology*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 28–43. <https://doi.org/10.33736/bjrst.220.2015>
42. Saksa T., Heiskanen J., Miina J., Tuomola J., Kolström T. Multilevel Modelling of Height Growth in Young Norway Spruce Plantations in Southern Finland. *Silva Fennica*, 2005, vol. 39, no. 1, pp. 143–153. <https://doi.org/10.14214/sf.403>
43. The R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*: Reference Index. Austria, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. 3893 p.
44. Wickham H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York, Springer Cham, 2016. 260 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>

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