

Научная статья

УДК 630*231:631.412

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-35-49

**Влияние почвенных свойств на подрост *Picea abies* (L.)
Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) при лесовозобновлении на сплошной
вырубке в средней подзоне тайги Архангельской области**

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4665>

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

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

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](https://orcid.org/0000-0002-1655-7212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

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

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия; a.ilintsev@narfu.ru✉, nakvasina@yandex.ru, a.g.volkov@narfu.ru, aleksandr_bogd@mail.ru

Поступила в редакцию 08.04.25 / Одобрена после рецензирования 16.06.25 / Принята к печати 19.06.25

Аннотация. Повреждение почвы лесозаготовительной техникой на вырубках – одно из негативных экологических последствий, которые сказываются на последующем лесовозобновлении. Целью проведенного исследования было выявление наиболее значимых для ели обыкновенной почвенных факторов при ее восстановлении на поврежденных при лесозаготовках участках. Исследование проводили на 7-летней сплошной вырубке из-под черничного типа леса в Вилегодском лесничестве Архангельской области. Замерили основные биометрические показатели у 40 экземпляров подроста ели на пасеке; у 20 – на волоке с мелкими повреждениями (глубина менее 15 см); у 20 – на волоке со значительными повреждениями (глубина 15–30 см). В корнеобитаемом слое почвы вблизи каждого растения взяли образцы почв, у которых в лабораторных условиях определили водно-физические и агрохимические показатели. Для анализа данных использовали методы многомерной статистики. Установлено, что наиболее отзывчивыми на различия условий произрастания являются высота, связанная с приростом, а также длина боковых корней. Выявлено, что по водно-физическим и агрофизическим свойствам почвы к ели на пасеке ближе ель на почве с мелкими повреждениями. Различия по свойствам почвы на участках волоков с мелкими и глубокими повреждениями связаны с уплотнением после проезда лесозаготовительной техники. Эти условия определили лучшее развитие подроста на пасеке по сравнению с поврежденными участками. Выявлено, что приоритет в обеспечении ростовых параметров ели в первые годы жизни обеспечивает большую плотность твердой фазы почвы, а также тесно связанные с этим показателем плотность сложения, общую пористость и пористость аэрации. Одним из факторов, ограничивающих рост ели в местах повреждения почвенного покрова, является глубина повреждения. Из агрохимических свойств почвы значимы содержание органического углерода и общего азота. Таким образом, чрезмерное колесобразование,

ухудшая почвенные свойства, может препятствовать успешному лесовозобновлению. Необходимо ограничивать образование глубоких колеи при лесозаготовках.

Ключевые слова: ель обыкновенная, *Picea abies*, вырубка, подзолистая почва, повреждения лесной почвы, волокни, водно-физические свойства почвы, агрохимические свойства почвы, подрост, биометрические показатели подроста, влияние почвы на рост, лесовозобновление

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>.

Благодарности: Агрохимические 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. Влияние почвенных свойств на подрост *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) при лесовозобновлении на сплошной вырубке в средней подзоне тайги Архангельской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 35–49. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-35-49>

Original article

The Effect of Soil Properties on the Seedlings of *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) in Reforestation at Clear-Cutting in the Middle Taiga Subzone of the Arkhangelsk Region

Aleksey S. Ilintsev^{1,2✉}, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist, Assoc. Prof.;

ResearcherID: N-6286-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4665>

Elena N. Nakvasina², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: A-5165-2013,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

Alexey G. Volkov², Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: D-7384-2017,

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, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

¹Northern Research Institute of Forestry, Arkhangelsk, Russia; a.ilintsev@narfu.ru✉, aleksandr_bogd@mail.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia; a.ilintsev@narfu.ru✉, nakvasina@yandex.ru, a.g.volkov@narfu.ru, aleksandr_bogd@mail.ru

Received on April 8, 2025 / Approved after reviewing on June 16, 2025 / Accepted on June 19, 2025

Abstract. Soil disturbances caused by harvesting and logging machinery and equipment at cutting areas are one of the negative environmental impacts that affect subsequent natural reforestation. The research aimed at identifying the most important soil factors for Norway spruce recovery in areas disturbed by harvesting and logging. The study was carried out at the 7-year-old clear-cutting area in a blueberry forest in the Vilegodsky Forestry District of the Arkhangelsk Region. Basic biometric parameters were recorded for 40 spruce young trees at the cutting strip; for 20 trees on a skid trail with shallow disturbances (depth less than 15 cm); and for 20 trees on a skid trail with deep disturbances (depth 15–30 cm). Soil samples were collected from the root zone near each plant, and their water-physical and agrophysical properties were tested in the laboratory. Multivariate statistical methods were used to analyze the data. It has been found that the traits most responsive to variations in growing conditions are

height, as defined by increment, and the length of lateral roots. The study showed that, in terms of the soil's water-physical and agrophysical properties, the spruce trees at the cutting strip are more similar to those growing on soil with shallow disturbances. Differences in soil properties between areas with shallow and deep disturbances are related to soil compaction caused by the passage of harvesting and logging machinery and equipment. These conditions led to better growth of young trees at the cutting strip compared to the disturbed areas. High density of the soil solid phase, as well as bulk density, total porosity, and aeration porosity – which are closely related to this parameter – have been found to be key factors in ensuring spruce growth parameters throughout the first few years of life. The depth of disturbance is one of the factors limiting spruce growth in areas where the soil cover has been disturbed. The organic carbon and total nitrogen content are significant parameters of the soil's agrochemical properties. Thus, excessive rutting degrades soil properties and can hinder successful reforestation. It is necessary to limit the formation of deep ruts during harvesting and logging operations.

Keywords: Norway spruce, *Picea abies*, clear-cutting, podzolic soil, forest soil disturbances, skid trails, water-physical soil properties, agrochemical soil properties, young growth, young growth biometric parameters, soil effect on growth, reforestation

Funding: This research was funded by the Russian Science Foundation grant No. 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>.

Acknowledgments: The agrochemical soil properties determined at the Certified Testing Laboratory affiliated with the Federal State Budgetary Institution “Arkhangelsk Agrochemical Service Station”.

For citation: Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Volkov A.G., Bogdanov A.P. The Effect of Soil Properties on the Seedlings of *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) in Reforestation at Clear-Cutting in the Middle Taiga Subzone of the Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 35–49. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-35-49>

Введение

Лесозаготовительные работы, проводимые с использованием современной техники (харвестеры + форвардеры), наносят серьезные экологические повреждения почвенному и растительному покровам, однако их применение в мире растет в геометрической прогрессии [17]. Особенно чувствительны к ним подзолистые почвы, распространенные на севере России [14].

Одним из основных повреждений почвенного покрова считается уплотнение, сопровождающееся перемешиванием и сдвиганием почвы, что приводит к ее морфологическим, водно-физическим и химическим изменениям [6, 9, 17, 20, 32]. При сдвиге физических параметров возможно нарушение водных потоков, в т. ч. застой влаги в колеях, что зачастую приводит к локальной смене процесса почвообразования [11, 14]. Повреждения почвы носят долговременный характер, и, хотя несколько сглаживаются за первые 2–3 года [7, 21], сохраняются до 30 лет и более [11, 34].

В то же время экологические последствия зависят не только от механизмов, применяемых на лесозаготовках, но и от многих природных факторов: свойства и строение почвы, уклон местности, наличие или отсутствие порубочных остатков на волоках и др.

Большое значение имеет также интенсивность воздействия транспортного средства, т. е. число проходов техники [9, 18, 19, 28]. Глубина повреждения почвы (колеи разной глубины) влияет на почвенные параметры и может опре-

делять успешность возобновления. Тем более что при малом числе проходов техники (3) сохраняется исходная подзолистая почва, тогда как при большем числе проходов (10) на дне колеи формируется турбированный горизонт [9].

Повреждения почвы лесозаготовительной техникой на волоках сказываются на лесовозобновлении. На уплотненной почве хуже прорастают семена, замедляется развитие самосева и подроста [9, 17, 18, 26, 31, 32]. С точки зрения восстановления экосистем важно с помощью междисциплинарных подходов [21] установить показатели, ограничивающие возобновление древесных пород на поврежденных участках. Прежде всего, речь идет о почвенных характеристиках, их сравнении с природными, формирующимися на неповрежденных почвах, в т. ч. на пасаках, где морфологически почвы близки к фоновым [9]. Подобные аспекты взаимодействия почвы и семян находятся в центре внимания при подборе способов обработки почвы в целях лесовосстановления [5]. По теме влияния почвы на растения вырубок, особенно молодого возраста, подобных работ мало, и в основном они касаются потоков веществ в системе почва–фитоценоз [2, 3].

Цель исследования – выявить закономерности влияния комплекса водно-физических и агрохимических свойств почвы на рост и развитие ели обыкновенной при ее восстановлении в местах с разной степенью повреждения почвенного покрова при лесозаготовках; отобрать наиболее значимые почвенные факторы для обеспечения роста ели на 7-летний вырубке из-под черничного типа леса в Двинско-Вычегодском таежном районе для экологического управления процессом естественного лесовосстановления.

Объекты и методы исследования

Исследование провели в 2024 г. на 7-летней вырубке с мерами содействия естественному лесовозобновлению в черничном типе условий произрастания в Вилегодском лесничестве Архангельской области (Двинско-Вычегодский таежный район). Лесосека была разработана в 2017 г. с использованием комплекса лесозаготовительной техники из харвестера John Deere 1270 и форвардера John Deere 1210 по сортиментной технологии: ширина технологических коридоров составляла 4–5 м, ширина пасаек – 16–18 м. Площадь вырубки – 4,3 га.

Древостой до сплошной рубки имел следующие характеристики: состав – 7Е1С2Б, класс возраста – 10, полнота – 0,6, средняя высота – 16 м, диаметр – 22 см, запас древесины – 160 м³/га, тип леса – ельник черничный, класс бонитета – V. Рельеф равнинный. Почва – подзолистая иллювиально-железистая супесчаная на среднем суглинке, типичная для района исследования. В 2019 г. количество жизнеспособного подроста ели после рубки составило 1,4 тыс. шт./га. Преобладал мелкий и средний подрост.

На пасаках и волоках у подроста ели последующей генерации близкого возраста (5–7 лет) измерили основные биометрические показатели: надземную часть, в т. ч. высоту – от поверхности почвы до верхушечной почки, прирост по высоте за последние 3 года, диаметр стволика на уровне поверхности почвы; подземную часть – длину бокового и главного корней. Обследовали 40 экземпляров подроста ели на пасаке; 20 – на волоке с мелкими (глубина менее 15 см) повреждениями почвы; 20 – на волоке со значительными повреждениями (15–30 см).

В корнеобитаемом слое каждого экземпляра подроста ели отобрали образцы почвы для оценки ее свойств. Сбор и обработку образцов проводили в соответствии с устоявшимися в лесном почвоведении методами [13]. Использовали металлический цилиндр с режущими краями (бура), вместимостью 52,78 см³ (диаметр – 4,1 см, длина – 4 см). Образцы взвесили на аналитических весах с точностью до 0,01 г. В лабораторных условиях определили основные водно-физические свойства почвы: полевую влажность, плотность сложения, плотность твердой фазы, общую пористость, пористость аэрации [12, 30]. pH_{KCl} установлена по ГОСТ 26483–85, массовая доля органического вещества (С) – ГОСТ 26213–2021 п. 6.1, массовая доля подвижных форм калия (K_2O) и фосфора (P_2O_5) – ГОСТ Р 54650–2011, общий азот (N) – ГОСТ Р 58596–2019 п. 7.1.

Для анализа полученных показателей использовали методы многомерной статистики. В связи с тем, что исходные данные не подчинялись закону нормального распределения, был выбран метод, устойчивый к отклонениям. Различия в биометрических показателях подроста ели на разных микросайтах, а также влияние на них почвенных свойств устанавливали с помощью метода прямой (ограниченной) ординации RDA [23]. Он представляет собой прямое расширение множественной регрессии для моделирования данных с многомерным откликом (биометрические показатели подроста). Результатом является сжатое пространство признаков с осями, обусловленными (взвешенными) независимыми (почвенными) переменными. Такие оси объясняют зависимость матрицы откликов от матрицы предикторов [16]. Перед анализом данные стандартизировались.

Статистическую значимость различий между микросайтами по биометрическим показателям подроста ели определяли с помощью дисперсионного анализа, основанного на матрице сходства подроста [15, 27]. В качестве меры различий использовали расстояние Евклида. Значение p получали с помощью перестановочного теста [25].

Все расчеты проводили с использованием статистического языка R [33]. Применяли пакеты: *vegan* [29], *ggplot2* [35].

Результаты исследования и их обсуждение

Подрост ели на пасеке по биометрическим показателям заметно превосходит подрост на поврежденных участках (рис. 1). Для него характерна средняя высота 56 см, с линейным среднегодовым приростом 10 см, а также хорошее развитие корневой системы – как главного корня, так и боковых разветвлений. Ель на поврежденных участках отстает по сравнению с подростом на пасеке по росту как надземных, так и подземных органов. Подрост на уплотненной почве образует короткие основные корни, немногочисленные и недлинные мелкие всасывающие корни [22, 26, 32], что снижает поглощение воды растениями и приводит к ограничению фотосинтетических процессов.

Рост ели на почве с мелкими и глубокими повреждениями достаточно близок. Это может быть связано со строением почвы на дне колеи (повреждения) и строением того слоя, в котором распространяются корни подроста. При глубоких повреждениях (более 15 см) в образующийся турбированный слой примешиваются порубочные остатки и органика лесной подстилки [9, 14], при разложении они могут обеспечивать почву азотом.

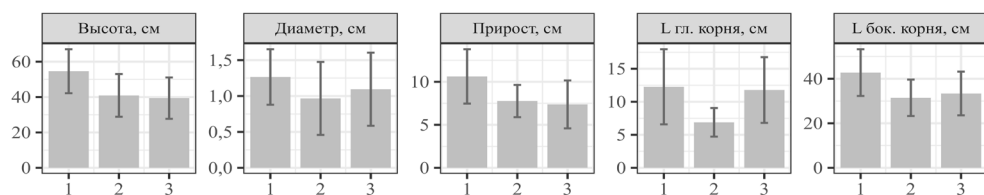


Рис. 1. Биометрические показатели подроста ели обыкновенной на микросайтах: 1 – пасека; 2 – мелкие повреждения; 3 – глубокие повреждения.

Среднее значение $\pm$ стандартное отклонение. Л. гл. корня, Л. бок. корня – длина главного и бокового корней соответственно

Fig. 1. Biometric parameters of spruce young trees at microsites: 1 – cutting strip; 2 – shallow disturbances; 3 – deep disturbances. Mean $\pm$ standard deviation. Л. гл. корня, Л. бок. корня – lengths of the main and lateral roots, respectively

По комплексу биометрических показателей (рис. 2) подрост ели на разных микросайтах достоверно отличается ($R^2 = 0,18$ при $p = 0,009$).

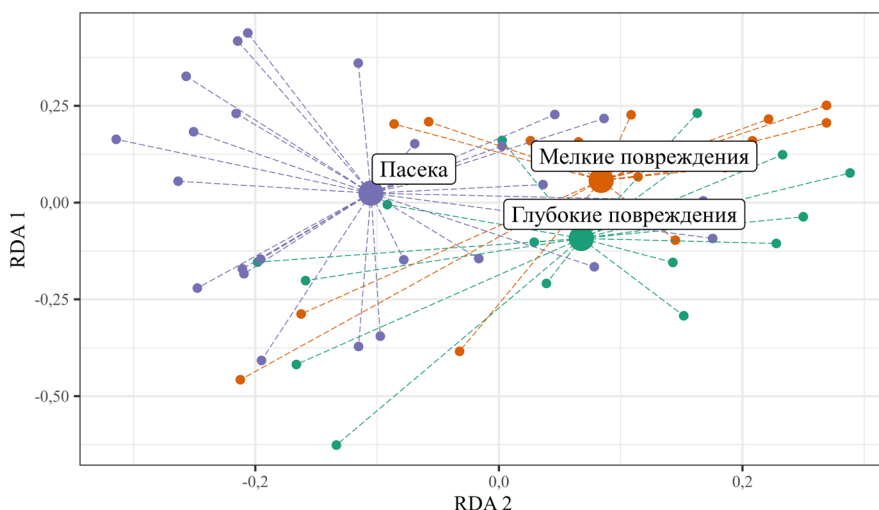


Рис. 2. Результаты прямой ординации подроста ели на разных участках произрастания в пространстве первых 2 осей (RDA 1 и RDA 2)

Fig. 2. Results of the direct ordination of spruce young trees at different growing sites on the first two axes (RDA 1 and RDA 2)

При этом на поврежденных участках присутствует подрост, растущий так же, как и на пасеке, что делает общую картину менее выраженной. Установлены различия по комплексу показателей роста между подростом пасеки и участков как с мелкими ($R^2 = 0,24$; $p = 0,002$), так и с глубокими повреждениями ($R^2 = 0,27$; $p = 0,002$). Однако различные биометрические показатели подроста вносят разный вклад в формирование отличий между подростом на разных участках. Наибольший вклад в различия между подростом на пасеке и участках с мелкими повреждениями принадлежит длине боковых корней, которая обеспечивает около 33 % различий (рис. 3).

У подроста на пасеке длина боковых корней на 43 % больше, чем у подроста на участках с мелкими повреждениями. Достоверные различия между подростом на этих участках установлены и по высоте. В опытах с ольхой и кленом [34] отрицательное влияние уплотнения почвы также больше сказалось на росте корней, чем надземной части.



Рис. 3. Различия подроста на микросайтах в пространстве первых 2 осей прямой ординации (RDA 1 и RDA 2): а – пасаеки и места глубоких повреждений ($R^2 = 0,24$; $p = 0,002$); б – пасаеки и места мелких повреждений ($R^2 = 0,27$; $p = 0,002$); в – места мелких и глубоких повреждений ($R^2 = 0,02$; $p = 0,18$). Стрелками указаны векторы, вносящие существенный вклад в различия участков ($p < 0,05$): 1–5 – высота, диаметр, прирост, длина главного и бокового корней соответственно, см

Fig. 3. Differences in young trees at microsites on the first two axis of direct ordination (RDA 1 and RDA 2): а – cutting strips and sites with deep disturbances ($R^2 = 0.24$; $p = 0.002$); б – cutting strips and sites with shallow disturbances ($R^2 = 0.27$; $p = 0.002$); в – sites with shallow and deep disturbances ($R^2 = 0.02$; $p = 0.18$). The arrows show the vectors that contribute significantly to the site differences ($p < 0.05$): 1–5 – height, diameter, growth, and length of the main and lateral roots, respectively, cm

Между подростом на пасаеке и участках с глубокими повреждениями почвы наибольший вклад в различия вносит линейный прирост (высота) – около 39 %. У подроста ели на пасаеке средний прирост по высоте на 48 % больше, чем у подроста на участках с глубокими повреждениями почвы. Достоверные различия также установлены по другим биометрическим показателям в этой паре групп, однако их вклад в комплекс показателей значительно ниже.

Различия в характеристиках подроста на разных участках с повреждением почвенного покрова в целом незначимы ($R^2 = 0,02$; $p = 0,18$), однако наблюдаются некоторые различия по длине главного корня ($p = 0,061$) и диаметру ($p = 0,045$), что может быть связано со свойствами почвы в корнеобитаемом слое. На более заметное снижение длины ствола, длины главного корня и общей сухой биомассы клена и ольхи при произрастании на почве с мелкими повреждениями (2 прохода) по сравнению с более интенсивными (6 и 10) указывали зарубежные исследователи [28].

Водно-физические и агрохимические свойства почвы на вырубках зависят от исходной почвы и определяются степенью ее перемешанности и строением турбированных горизонтов при проезде лесозаготовительной техники. Оказывает влияние и глубина повреждения, которая является индикатором уровня воздействия в экологических исследованиях. По мнению [14], при мелких повреждениях почвы (соответствуют глубине повреждения при 3 проходах техники) наблюдается в основном сдавливание, а при глубоких (10 проходов) – сдавливание, турбирование и перемешивание минеральной части почвы с лесной подстилкой и порубочными остатками. Примешивание органической составляющей в почвенную массу изменит и физические, и химические свойства почвы.

Для статистических расчетов была использована глубина колеи в месте расположения подроста относительно уровня пасаки, отражающая различия в строении почвы после повреждения различной силы. Так, в нашем случае для мелких повреждений она составляла в среднем 9,0 см (с колебаниями от 4 до 15 см), а для глубоких – 22,1 см (от 16 до 29 см).

Рассматриваемые водно-физические (влажность, плотность сложения и твердой фазы, общая пористость и пористость аэрации) и агрохимические (содержание элементов питания и pH среды) свойства почвы являются наиболее наглядными для оценки воздействия лесозаготовительной техники на лесные почвы [17] и определяют рост растений [5].

В корнеобитаемом слое почвы у подроста на неповрежденных и поврежденных участках наблюдаются различия по водно-физическим и агрохимическим свойствам (рис. 4). Так, плотность сложения колеблется от 1,33 до 1,46 г/см³, плотность твердой фазы – от 2,09 до 2,44 г/см³, влажность – от 21,6 до 25,9 %, общая пористость – от 29,5 до 43,4 %, пористость аэрации – от 2,2 до 11,9 %. В целом для нативной почвы пасаки характерна меньшая изменчивость признаков. Различия по водно-физическим свойствам на участках волоков с мелкими и глубокими повреждениями связаны с уплотнением после проезда лесозаготовительной техники. Кроме того, вклад вносит строение корнеобитаемого слоя в местах повреждений. Для участков, подвергшихся воздействию лесозаготовительной техники, важно установить различия с почвой пасаки.

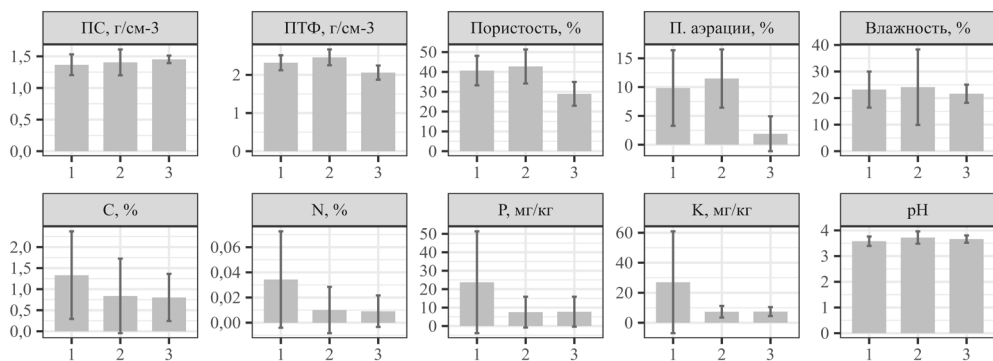


Рис. 4. Водно-физические и агрохимические свойства почвы в корнеобитаемом слое подроста ели на разных микросайтах: 1 – пасака, 2 – мелкие повреждения, 3 – глубокие повреждения. Среднее значение $\pm$ стандартное отклонение.

ПС – плотность сложения; ПТФ – плотность твердой фазы; П. аэрации – пористость аэрации; С – органический углерод, %; N – общий азот, %; Р – подвижный фосфор, мг/кг; К – подвижный калий, мг/кг; pH – pH_{KCl} солевой вытяжки

Fig. 4. Water-physical and agrochemical properties of the soil in the root zone of spruce young trees at different microsites: 1 – cutting strip, 2 – shallow disturbances, 3 – deep disturbances. Mean $\pm$ standard deviation. ПС – bulk density; ПТФ – solid soil phase density, g/cm³; П. аэрации – aeration porosity; С – organic carbon, %; N – total nitrogen, %; Р – labile phosphorus, mg/kg; К – labile potassium, mg/kg; pH – pH_{KCl} of salt extract

При сравнении водно-физических свойств почвы на пасаке и в местах мелких повреждений установлены существенные различия плотности сложения ($p = 0,05$) на границе доверительного интервала и влажности ($p = 0,07$) на уровне тенденции. Подобное увеличение плотности сложения подзолистой почвы отмечали при 3 проходах грузежной техники [18].

Наибольшее число водно-физических показателей почвы, значимо отличающихся от показателей почвы на пасеке, установлено для участков с глубокими повреждениями. Так, обнаружены существенные различия плотности твердой фазы ($p = 0,04$), пористости ($p = 0,001$) и пористости аэрации ($p = 0,002$). При этом достоверной разницы в плотности сложения не установлено, что, скорее всего, связано с уплотнением почвы после проезда лесозаготовительной техники. Уплотнение и привнесение органической массы при перемешивании почвы может нивелировать существенные изменения физических свойств [14]. По мнению [8], при большом числе проходов техники (более 5) плотность сложения почвы уменьшалась, но оставалась выше, чем на пасеке. Другие исследователи [18] отмечали, что при большом числе проходов техники плотность верхнего турбированного слоя изменялась незначительно, а различия наблюдались в нижележащем нетрансформированном горизонте.

При сравнении водно-физических свойств почвы на участках мелких и глубоких повреждений установлены достоверные различия плотности твердой фазы ($p = 0,001$), пористости ($p = 0,001$) и пористости аэрации ($p = 0,001$). На участках с мелкими повреждениями почвы эти показатели заметно выше, что может быть связано не только с интенсивностью движения техники, но и с примешиванием детрита и лесной подстилки при проезде техники.

Кислые и бедные питательными веществами подзолистые почвы в пасеке по своим агрохимическим свойствам являются типичными для региона, но их повреждение во время лесозаготовительных работ может усиливать физико-химические и биологические процессы [6]. По мнению [20], на поврежденных при лесозаготовке участках волоков происходит увеличение микробной (МВС/SOC) и ферментативной активностей, что приводит к ускорению оборота углерода и увеличению потери CO_2 .

В целом агрохимические показатели в корнеобитаемом слое у подроста достаточно низкие и колеблются незначительно: доля органического вещества – от 0,80 до 1,44 %, доля азота – от 0,008 до 0,061 %, подвижных форм фосфора – от 7,8 до 22,5 мг/кг, подвижных форм калия – от 7,5 до 26,7 мг/кг. Наиболее высокие показатели характерны для пасеки по сравнению с поврежденными почвами. При этом как ненарушенная, так и поврежденная почва остается кислой, $\text{pH}_{\text{KCl}} = 3,5\text{--}3,7$.

В нашем случае достоверно различается для пасек и участков с повреждениями содержание подвижного калия ($p = 0,044$ и $p = 0,055$ соответственно), фосфора ($p = 0,066$ и $p = 0,056$) и азота ($p = 0,041$ и $p = 0,118$). Различия по органическому углероду в обоих случаях недостоверны.

Отсутствуют достоверные различия химических показателей почвы для участков с мелкими и глубокими повреждениями.

Сравнение характеристик между вариантами выявляет действие отдельного фактора, однако почвенные свойства связаны между собой, могут влиять прямо и косвенно. Это не всегда реально учесть при парных статистических расчетах. Поэтому при наличии большого числа разнонаправленных показателей использовали анализ с многомерным откликом, который позволяет определить комбинации предикторов, объясняющих максимальную изменчивость характеристик.

Визуализация направленности и силы влияния почвенных факторов на биометрические показатели подроста ели на пасеке и участках с повреждени-

ями приведена на рис. 5. В роли предикторов выступают основные почвенные свойства: водно-физические (влажность, плотность твердой фазы почвы, общая пористость), агрохимические (органическое вещество почвы, общий азот и фосфор) и глубина повреждений. Из построения моделей исключены плотность сложения почвы и пористость аэрации по причине их высокой корреляции с рассматриваемыми свойствами почвы (VIF равен 75 и 36 соответственно).

Хорошо заметна разнонаправленность векторов водно-физических и агрохимических свойств почвы и одного фактора, непосредственно связанного с повреждениями почвы (глубина колеи), который синхронизируется с плотностью твердой фазы, тесно связанной с плотностью сложения. Эти 2 фактора могут быть определяющими в группе рассматриваемых показателей.

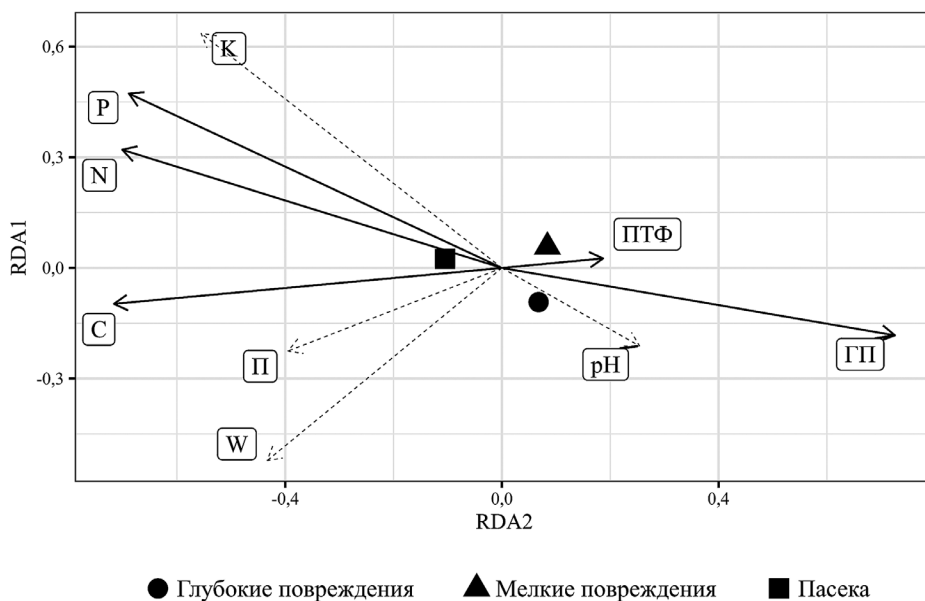


Рис. 5. Влияние почвенных свойств на подрост ели обыкновенной на разных участках в пространстве первых 2 осей прямой ординации (RDA 1 и RDA 2). Стрелками указаны векторы: П – пористость, %; W – влажность, %; ГП – глубина повреждений, см; ПТФ, C, N, P, K, pH – см. рис. 4

Fig. 5. Effect of soil properties on spruce young trees at different sites in the first two axes of direct ordination (RDA 1 and RDA 2). The arrows show the vectors: П – porosity, %; W – moisture, %; ГП – depth of disturbances, cm; ПТФ, C, N, P, K, pH – see fig. 4

Если оценить векторность почвенных показателей пасеки и поврежденных участков, то лучшие свойства видны для пасеки. Расположение пасеки в пространстве осей RDA отражает оптимум почвенных свойств для 7-летнего подроста ели в черничном типе леса. Условия, обеспечивающие рост вида на участках мелких повреждений, доказанно ближе к почвенным условиям пасеки. С увеличением глубины повреждения почвы, по крайней мере в пределах 15–30 см, сходство почвенных условий с пасекой снижается. Это связано с увеличением не только глубины повреждения почвы, но и плотности твердой фазы, сложения, а также со снижением количества органического вещества в почве, общего азота и подвижных форм фосфора.

В комплексе почвенных факторов (водно-физические и агрохимические), которые связаны между собой и действуют синхронно, важно выделить наиболее значимые, определяющие развитие подроста на вырубке [5, 7]. Для отбора репрезентативных показателей из числа изученных построили 6 моделей с разным числом предикторов.

Анализ избыточности (RDA) показал, что почвенные свойства обуславливают до 40 % дисперсии биометрических показателей подроста ели, из них 34 % приходится на первую ось (RDA 1). Неучтенные факторы, которые, вероятно, относятся к абиотическим, объясняют 60 % вариабельности биометрических показателей подроста, с долей первой оси РС 1 32 %.

Селекция модели RDA с помощью информационного критерия (AIC) и коэффициентов детерминации (R^2) позволила выявить почвенные факторы, наиболее влияющие на биометрические показатели роста ели обыкновенной на рубках в условиях черничного типа леса (см. таблицу).

Статистические характеристики моделей RDA
Statistics of RDA models

Модель	Число переменных	Коэффициент детерминации		Псевдо-критерий AIC	Псевдо-F-статистика	
		обычный	приведенный		F	Pr (>F)
1: Y ~ ПТФ + П + ГП + W + C + N + P + K + pH	9	0,39	0,28	87,79	3,75	0,0001
2: ГП	1	0,18	0,16	90,68	12,91	0,0001
3: ГП + C	2	0,27	0,24	85,36	10,85	0,0001
4: ГП + C + ПТФ	3	0,31	0,27	83,54	8,78	0,0001
5: ГП + C + ПТФ + N	4	0,35	0,30	82,44	7,54	0,0001
6: ГП + C + ПТФ + N + P*	5	0,37	0,32	81,70	6,69	0,0001

Примечание: Условные обозначения – см. рис. 4, 5. *Фосфор влияет на уровне тенденции, $p = 0,061$.

Использованные для построения моделей предикторы (модель 5) описывают 37 % изменчивости 7-летнего подроста ели, что лишь на 2 % меньше, чем модель 1. При этом скорректированный R^2 больше, чем у модели 1. Исходя из этого, 4 показателя почвы можно признать основными для обеспечения роста ели на лесосеках: глубину повреждения почвы, плотность твердой фазы, содержание органического углерода и общего азота. К значимым априори можно добавить и 2 тесно связанных с плотностью твердой фазы и пористостью показателя – плотность сложения и пористость аэрации.

То есть наиболее значимыми факторами для роста 7-летнего подроста ели на рубке из-под черничного типа леса оказались физические. Ранее [5] также выделили близкую группу водно-физических свойств почв (плотность сложения, пористость, пористость аэрации, влажность), определяющих рост растений. Именно эти свойства обеспечивают насыщение почвы водой и кислородом, поддерживают биогеохимические циклы, доступность питательных веществ и фотосинтезирующую деятельность растительности. Исследованиями [20] увеличение объемной плотности мелкозернистой почвы было определено как «золотая черта», которая определяет влияние трелевочных волоков на многие параметры почвы. Другие авторы [34] считают наиболее влияющим на рост растений сопротивление проникновения/твердость почвы, показатель близкий по своей сути с плотностью сложения.

В число репрезентативных факторов входят также содержание органического вещества и азота. Именно органическое вещество, примененное при турбации почв после прохода лесозаготовительной техникой, при разложении обеспечивает почву азотом и элементами питания, стимулирующим рост растений [4, 24]. Важную роль органического вещества почвы для роста растений отмечали [5, 7, 10]. Это характерно и для азота, поступающего в почву из разлагающегося органического вещества [1].

Однако ограничивающей рост ели в местах повреждения почвенного покрова на волоках можно признать глубину повреждений почвы, т. е. образующиеся колеи, в которых идет поселение подроста последующей генерации. По мнению [18], именно число проездов форвардера, отражающееся глубиной повреждения почвенного покрова, определяет изменение почв.

Заключение

Многомерный анализ (RDA) позволил на примере изучения роста и почвенных свойств корнеобитаемого слоя 7-летнего подроста ели обыкновенной, произрастающего на вырубке в черничном типе условий в Архангельской области (подзона средней тайги), выявить различия в его биометрических параметрах и дать оценку влияния физико-химических свойств почвы с учетом произрастания ели в местах мелких (до 15 см) и глубоких (15–30 см) повреждений на волоках в сравнении с пасекой.

При поселении подроста ели на участках с мелкими повреждениями биометрические показатели надземной и подземной частей растений оказались значимо ниже, чем у подроста на пасеке. При глубоких повреждениях почвы различия с подростом пасеки сказались преимущественно на высоте растений.

В то же время именно для корнеобитаемого слоя подроста в местах с глубокими повреждениями почвы установлены существенные различия плотности твердой фазы, общей пористости и аэрации по сравнению с пасекой. Для корнеобитаемого слоя подроста в местах мелких повреждений статистически значимые различия с пасекой установлены в плотности сложения и (на уровне тенденции) во влажности. Разная степень изменения почвенных свойств может быть обусловлена одновременным уплотнением почвы техникой и привнесом органического материала при перемешивании порубочных остатков и растительной массы с минеральной частью почвы.

Из агрохимических свойств достоверно различаются для пасеки и участков с повреждениями, а также между участками с мелкими и значительными повреждениями содержание подвижного калия, фосфора и общего азота. Количество органического углерода одинаково для всех исследованных вариантов.

Почвенные свойства суммарно обуславливают до 40 % дисперсии биометрических показателей подроста ели. Расположение участков в пространстве осей RDA с оценкой по комплексу почвенных свойств выявило, что условия, обеспечивающие рост ели при произрастании на местах с мелкими повреждениями доказанно ближе к почвенным условиям в корнеобитаемом слое подроста на ненарушенной почве пасеки. При большей глубине повреждения почвы на волоках, по крайней мере в пределах 15–30 см, сходство почвенных условий с пасекой заметно снижается. Фактор глубины повреждения почвы является ведущим в комплексе изученных свойств. При обеспечении

роста 7-летней ели на вырубке большое значение имеют физические свойства почвы в корнеобитаемом слое подроста. К ним относятся плотность твердой фазы почвы, а также тесно связанные с этим показателем плотность сложения и общая пористость, пористость аэрации. Из агрохимических свойств почвы важны содержание органического углерода и общего азота, что связано с при-мешиванием детрита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бобкова К.С., Галенко Э.П., Загирова С.В., Сенькина С.Н., Тужилкина В.В., Машика А.В., Патов А.И., Никонов В.В., Лукина Н.В., Исаева Л.Г. Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции / отв. ред. К.С. Бобкова, Э.П. Галенко. СПб.: Наука, 2006. 337 с.

Bobkova K.S., Galenko E.P., Zagirova S.V., Senkina S.N., Tuzhilkina V.V., Mashika A.V., Patov A.I., Nikonov V.V., Lukina N.V., Isayeva L.G. *Virgin Spruce Forest of North: Biodiversity, Structure, Functions*. Ed. by K.S. Bobkova, E.P. Galenko. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2006. 337 p. (In Russ.).

2. Бобкова К.С., Лиханова Н.В. Потоки азота и зольных элементов в системе «почва–фитоценоз» на рубках среднетаежных ельников Республики Коми // Лесоведение. 2019. № 6. С. 512–523.

Bobkova K.S., Likhanova N.V. Fluxes of Nitrogen and Mineral Elements between Soils and Phytocenosis on the Clearcuts in Spruce Forests of Middle Taiga, the Komi Republic. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2019, no. 6, pp. 512–523. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819060020>

3. Бобкова К.С., Лиханова Н.В., Кузнецов М.А. Влияние промышленных рубок на круговорот веществ в системе почва–фитоценоз среднетаежных ельников на подзолистых почвах. СПб.: Наука, 2024. 246 с.

Bobkova K.S., Likhanova N.V., Kuznetsov M.A. *Effect of Industrial Logging on the Cycle of Substances in the Soil–Phytocenosis System of Middle-Taiga Spruce Forests on Peat-Podzolic Soils*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2024. 246 p. (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 Carbon Organic Matter Content in Middle Taiga Spruce Forests Growing on Automorphic Soils*. Saint 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 Plantations in the North*. Arkhangelsk, NRIF Publ., 2007. 292 p. (In Russ.).

6. Дымов А.А., Лаптева Е.М. Изменение подзолистых почв на двучленных отложениях при рубках // Лесоведение. 2006. № 3. С. 42–49.

Dymov A.A., Lapteva E.M. Changes in Podzolic Soils on Bilayered Deposits under the Influence of Felling. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2006, no. 3, pp. 42–49. (In Russ.).

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

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

8. Катаров В.К., Сюнев В.С., Ратькова Е.И., Герасимов Ю.Ю. Влияние форвардеров на лесные почвогрунты // Resources and Technology. 2012. Т. 9, № 2. С. 73–81.

Katarov V.K., Syuney V.S., Ratkova E.I., Gerasimov Y.Y. Impact of Wood Forwarding on Forest Soils. *Resources and Technology*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 73–81. (In Russ.).

9. Кутявин И.Н., Манов А.В., Старцев В.В., Дымов А.А. Влияние лесозаготовительной техники на динамику естественного возобновления леса после рубки хвойно-лиственного насаждения средней тайги // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 3. С. 123–132.

Kutyavin I.N., Manov A.V., Starcev V.V., Dymov A.A. The Logging Equipment Effect on the Dynamics of Natural Reforestation of After Cutting Mixed Coniferous-Deciduous Stand in the Middle Taiga. *Theoretical and Applied Ecology*, 2024, no. 3, pp. 123–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-3-123-132>

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 Plantations*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 220 p. (In Russ.).

11. Наквасина Е.Н., Ильинцев А.С., Дунаева А.-А.П. Восстановительные сукцессии повреждений почвенного покрова при проведении рубок ухода в ельнике черничном северной тайги // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2021. Т. 25, № 6. С. 11–19.

Nakvasina E.N., Ilintsev A.S., Dunaeva A.-A.P. Productive Soil Succession after Thinning in Northern Taiga Bilberry Spruce Forest. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 11–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-11-19>

12. Наквасина Е.Н., Любова С.В. Почвоведение. Архангельск: САФУ, 2016. 146 с.
Nakvasina E.N., Lyubova S.V. *Soil Science*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2016. 146 p. (In Russ.).

13. Наквасина Е.Н., Серый В.С., Семенов Б.А. Полевой практикум по почвоведению. Архангельск: Архангельск. гос. техн. ун-т, 2007. 127 с.

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

14. Огородняя С.А., Бутылкина М.А., Красиков С.Р., Дымов А.А. Физические свойства минеральных горизонтов почв вырубки (средняя тайга, Республика Коми) // Вестн. Московск. ун-та. Сер. 17: Почвоведение. 2024. Т. 79, № 2. С. 15–25.

Ogorodniaia S.A., Butylkina M.A., Krasikov S.R., Dymov A.A. Physical Properties of Upper Mineral Horizons of Cutting Area (Middle Taiga, Komi Republic). *Lomonosov Soil Science Journal*, 2024, vol. 79, no. 2, pp. 15–25. (In Russ.).
<https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-15-25>

15. 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>

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

17. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. Impact of Heavy Traffic on Forest Soils: A Review. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 338, pp. 124–138.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>

18. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutyavin I.N., Osipov A.F., Dubrovsky Yu.A. Changes in Soil and Vegetation with Different Number of Passes of Wheeled Forestry Equipment (Middle Taiga, Komi Republic). *Eurasian Soil Science*, 2022, vol. 55, pp. 1633–1646. <https://doi.org/10.1134/S1064229322110023>

19. Ilintsev A., Nakvasina E., Högbom L., Bogdanov A. Influence of Ruts on the Physical Properties of Gleyic Retisols after Logging Machinery Passage. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2022, vol. 37, iss. 4, pp. 254–263.
<https://dx.doi.org/10.1080/02827581.2022.2085785>

20. Klein-Raufhake T., Hölzel N., Schaper J.J., Hortmann A., Elmer M., Fornfeist M., et al. Severity of Topsoil Compaction Controls the Impact of Skid Trails on Soil Ecological Processes. *Journal of Applied Ecology*, 2024, vol. 61, iss. 8, pp. 1817–1828.
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.14708>

21. Labelle E.R., Hansson L., Högbom L., Jourgholami M., Laschi A. Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: A Comprehensive Review. *Current Forestry Reports*, 2022, vol. 8, pp. 20–37. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00155-6>
22. Latterini F., Dyderski M.K., Horodecki P., Rawlik M., Stefanoni W., Högbom L., et al. A Meta-Analysis of the Effects of Ground-Based Extraction Technologies on Fine Roots in Forest Soils. *Land Degradation & Development*, 2023, vol. 35, iss. 1, pp. 9–21. <https://doi.org/10.1002/ldr.4902>
23. Legendre P., Legendre L. *Numerical Ecology*. Amsterdam, Elsevier, 2012. 990 p.
24. Liang M., Sugimoto A., Tei S., Bragin I.V., Takano S., Morozumi T., et al. 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>
25. Manly B.F.J. *Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology*. London, Chapman & Hall, 2006. 455 p.
26. Mariotti B., Hoshika Y., Cambi M., Marra E., Feng Z., Paoletti E., Marchi E. Vehicle-Induced Compaction of Forest Soil Affects Plant Morphological and Physiological Attributes: A Meta-Analysis. *Forest Ecology and Management*, 2020, vol. 462, art. 118004. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118004>
27. 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)
28. Naghdi R., Tavankar F., Solgi A., Nikooy M., Marchi E., Picchio R. Effects on Soil Physicochemical Properties and Seedling Growth in Mixed High Forests Caused by Cable Skidder Traffic. *iForest*, 2023, vol. 16, iss. 2, pp. 127–135. <https://doi.org/10.3832/for4103-016>
29. Oksanen J., Simpson G., Blanchet F., Kindt R., Legendre P., Minchin P., et al. *Vegan: Community Ecology Package*. R Package Version 2.6-10, 2025. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (accessed 01.02.25).
30. Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Switzerland, Springer, 2013. 217 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4>
31. Picchio R., Mederski P.S., Tavankar F. How and How Much, Do Harvesting Activities Affect Forest Soil, Regeneration and Stands? *Current Forestry Reports*, 2020, vol. 6, pp. 115–128. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00113-8>
32. Picchio R., Tavankar F., Nikooy M., Pignatti G., Venanzi R., Lo Monaco A. Morphology, Growth and Architecture Response of Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and Maple Tree (*Acer velutinum* Boiss.) Seedlings to Soil Compaction Stress Caused by Mechanized Logging Operations. *Forests*, 2019, vol. 10(9), art. 771. <https://doi.org/10.3390/f10090771>
33. R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Austria, Vienna: The R Foundation for Statistical Computing, 2025. Available at: <https://www.R-project.org/> (accessed 01.02.25).
34. Tavankar F., Venanzi R., Nikooy M., Lo Monaco A., Picchio R., Naghdi R. The Influence of Logging-Related Soil Disturbance on Pioneer Tree Regeneration in Mixed Temperate Forests. *Plants*, 2024, vol. 13(15), art. 2149. <https://doi.org/10.3390/plants13152149>
35. Wickham H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York, Springer, 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 no conflict of interest