

ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЛЕСОЗАГОТОВОК НА НАРУШЕНИЕ ПОЧВЫ, СОСТОЯНИЕ ЖИВОГО НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА И ПОСЛЕДУЮЩЕЕ ВОЗОБНОВЛЕНИЕ ДЕРЕВЬЕВ В БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСАХ РОССИИ

© 2023 г. А. С. Ильинцев*

Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Архангельск, Россия

**E-mail: a.ilintsev@narfu.ru*

Поступила в редакцию 24.04.2023 г.

После доработки 26.06.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

Представлены материалы изучения физических свойств верхних горизонтов почвы, видового разнообразия живого напочвенного покрова и естественного возобновления деревьев на 1–15 летних вырубках. Заметное уплотнение почвы наблюдается в колеях проезда техники, преимущественно в толще почвы 0–10 см, но не в межколейном пространстве и пасаках. Установлено, что физические свойства (плотность сложения, общая пористость и пористость аэрации) верхних горизонтов почвы зависят от возраста вырубки и участка исследования ($p < 0.01$). Уплотнение почвы в колеях через 9–15 лет после рубки снижается до показателей на участках, где движение техники не осуществлялось. Заращение поврежденных участков вырубок происходит видами с широкой экологической амплитудой к экологическим факторам, а также видами рудералами и стабилизируется через 15 лет после рубки, когда уровень разнообразия приближается к нерубленным насаждениям. Возобновление вырубок идет в основном листовыми породами (осиной и березой), разрастающимися преимущественно на пасаках. В колеях и межколейных пространствах количество подраста в 2–7 раз меньше, чем на пасаках.

Ключевые слова: вырубки, лесозаготовительная техника, свойства почвы, травяно-кустарничковый ярус, подрост

DOI: 10.31857/S0869607123030072, **EDN:** NWTAMJ

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные процессы, в том числе технологические тренды [23], изменение климата [8] и растущий спрос на лесную продукцию и услуги требуют совершенствования стратегий управления лесами [27]. Леса во всем мире играют ключевую роль в экономике, которая оказывает на лесные экосистемы все большее антропогенное давление. Лесопользование происходит в контексте динамичных систем, включая не только экологические, но и социальные и политические. В рамках научных исследований необходимо сбалансировать противоречивые требования различных слоев общества к древесным продуктам и экосистемным услугам лесных насаждений для рационального использования лесных ресурсов. Значительная доля антропогенной нагрузки приходится на лесные почвы, которые весьма чувствительны к неправильному лесопользованию [14]. Изменение свойств почвы влияет на функционирование лесных экосистем, последующее возобновление деревьев, продуктивность лесов и биологическое разнообразие [15, 17, 19, 24].

Минимальное влияние лесозаготовительных операций на лесные почвы наблюдается в зимний сезон, когда почвы промерзли и покрыты устойчивым снежным покровом [19]. Однако климатические изменения и высокий круглогодичный спрос на древесину все чаще приводит к тому, что лесозаготовки ведутся на незамерзших почвах или во влажных условиях. Проведение лесосечных работ на почвах с низкой несущей способностью допускается в летний период с трелевкой древесины по волокам, укрепленными порубочными остатками. Однако погодные условия могут быстро изменить ситуацию на делянке, что делает лесозаготовку деликатной и сложной задачей.

В настоящее время на Европейском Севере России заготовка древесины осуществляется с применением тяжелой лесозаготовительной техники круглый год, даже летом, на плохо дренируемых почвах. Эти почвы характеризуются слабым почвогенезом, литологической неоднородностью, из-за чего подвержены специфическому воздействию лесозаготовительной техники. Возникающие при этом нарушения влекут определенные экологические последствия, связанные с изменением свойств почвы. Предпосылкой данных исследований является необходимость получения точных и глубоких знаний о влиянии современных лесозаготовительных работ на определенные типы лесных почв [1]. Заполнение пробелов в научных знаниях о воздействии лесозаготовительных операций на почвы способствует решению актуальных задач их сохранения.

Цель исследования состояла в том, чтобы оценить, как и в какой степени современная лесозаготовительная техника при заготовке древесины влияет на физические свойства почвы, напочвенный покров и естественное лесовозобновление.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в лесном регионе на территории Архангельской области, где активно проводятся сплошные рубки. Объекты исследования расположены в таежной зоне (подзоне средней тайги) в которой доминирующим типом растительности являются хвойные еловые леса, также известные как бореальные леса [3]. Ельники черничные влажные широко распространены в регионе исследования и вовлекаются в хозяйственное использование. Почвы на исследуемых вырубках характеризовались как полугидроморфные (глее-подзолистые). Продуктивность исходных древостоев на этих почвах низкая, преобладали насаждения IV и V класса бонитета с примесью листовенных пород. Тип леса — ельник черничный влажный (ельник долгомошный).

Заготовка древесины на всех участках была проведена с применением многооперационных лесозаготовительных машин по скандинавской технологии в летний сезон. Разработка лесосек проводилась по узкопосечной технологии: ширина технологических коридоров составляла 4–5 м, а ширина пазов — 16–18 м. Рубка выполнялась харвестером “John Deere 1270”, а транспортировка сортиментов — форвардером “John Deere 1210”.

Интенсивность сплошных рубок составляла до 95% от исходного запаса древостоя. Для обеспечения естественного лесовозобновления при разработке лесосек оставлялись семенные деревья в количестве не менее 20 шт./га. На некоторых лесосеках оставлялись неэксплуатационные участки леса с наличием природных объектов, имеющих природоохранное значение. Для сохранения биологического разнообразия были сохранены единичные деревья, присутствующие в составе древостоя и второй ярусы ели. Очистка мест рубок проводилась одновременно с заготовкой древесины путем укладкой порубочных остатков на волока.

Полевые исследования провели статистико-динамическим методом, который состоит в спорадическом изучении серии сплошных вырубков (более 20) разного возраста (1–7, 9, 13, 15) и однородных по лесорастительным условиям.

На каждой вырубке заложили временные учетные площадки размером 5×5 м по трансектам через 15–20 м. Одна трансекта располагалась на технологических коридорах, где движется лесозаготовительная техника, а другая на пасаках, где не предусматривается движение техники, в соответствии с технологическими картами разработки лесосек. На каждой трансекте закладывали по 15 учетных площадок. Общее количество учетных площадок составило 30 шт. На данных площадках проводили отбор образцов почвы, оценку живого напочвенного покрова и естественного лесовозобновления.

Для определения физических свойств отбирали образцы почвы в верхних минеральных горизонтах на глубине 0–10 и 10–20 см с помощью почвенного бура объемом 52.78 см³. Отбор образцов почвы на технологических коридорах проводили отдельно для следов проезда техники (колея) и межколейного пространства. На каждой учетной площадке собирали по 4 образца почвы. На учетных площадках, заложенных на пасаках, отбирали по 2 образца почвы. Общее количество взятых образцов на каждую вырубку – 90 шт. Все образцы после сбора взвешивали на аналитических весах с точностью до 0.01 г. В лабораторных условиях образцы почвы высушили при температуре 105°C до постоянной массы. Основные физические свойства почвы (плотность сложения, общую пористость и пористость аэрации) определили в соответствии с общепринятыми методами [5].

Для анализа ценофлоры на учетных площадках провели геоботанические описания. Идентификацию выявленных видов растений проводили с использованием общеизвестных определителей и интернет определителя [6]. По заложенным учетным площадкам для каждой вырубки (отдельно для волока и пасеки) составили список встречаемости сосудистых растений и мохообразных с учетом их площади проективного покрытия.

Для оценки последующего лесовозобновления выполнили сплошной переčet подроста на учетных площадках [7]. На учетных площадках, заложенных на технологических коридорах, оценивали приуроченность поселения (к колеям и межколейным пространствам). К подросту относили все древесные растения с диаметром на высоте груди (1.3 м) менее 6 см, который при учете классифицировали по древесным породам и категориям крупности. По материалам полевого учета определили количество подроста на 1 га.

Для установления связи между изучаемыми признаками провели дисперсионный, регрессионный и многомерный анализы в программах STATISTICA 12 (StatSoft) и R version 3.6.2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Физические свойства почв. В первые два года после рубки на вырубках увеличивается плотность сложения верхних горизонтов почвы, что приводит к снижению общей пористости и пористости аэрации (табл. 1). В последующие годы идет снижение плотности сложения и увеличение общей пористости и пористости аэрации. Наибольшее уплотнение наблюдается в колеях, при неоднократном проезде технических средств. Здесь ход восстановления первоначальных физических свойств идет гораздо медленней, чем на межколейном пространстве и пасаках, где не было воздействия лесозаготовительной техники.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что возраст вырубки и участок исследования значительно влияют на физические свойства верхних горизонтов почвы ($p < 0.01$). Таким образом, в колеях формируются критичные физические свойства, которые будут иметь различные экологические последствия для последующей лесовосстановительной сукцессии.

Видовое разнообразие живого напочвенного покрова. После сплошной рубки леса происходят сильные изменения в видовом составе напочвенного покрова (рис. 1).

Таблица 1. Физические свойства почвы на объектах исследования в зависимости от прошедшего возраста после рубки**Table 1.** Soil physical properties at the study sites, depending on the past age after logging

| Возраст после рубки | Колес | | | | | | Межкочейные пространства | | | | | | Пасеки | | | | | |
|---------------------------|-----------------------|------|------|-----|-------|-----|--------------------------|------|------|-----|-------|-----|-----------------------|------|------|-----|-------|-----|
| | BD, г/см ³ | | P, % | | Pa, % | | BD, г/см ³ | | P, % | | Pa, % | | BD, г/см ³ | | P, % | | Pa, % | |
| | M | m | M | m | M | m | M | m | M | m | M | m | M | m | M | m | M | m |
| На глубине 0–10 см | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1.48 | 0.04 | 43.2 | 1.5 | 10.4 | 0.8 | 1.26 | 0.03 | 50.2 | 1.4 | 13.6 | 1.1 | 1.19 | 0.04 | 52.9 | 1.5 | 15.9 | 1.0 |
| 2 | 1.57 | 0.05 | 38.4 | 2.0 | 10.2 | 1.2 | 1.33 | 0.04 | 47.8 | 1.5 | 13.6 | 1.6 | 1.31 | 0.04 | 48.5 | 1.6 | 14.2 | 1.3 |
| 3 | 1.49 | 0.04 | 40.8 | 1.5 | 8.7 | 1.3 | 1.24 | 0.04 | 51.2 | 1.5 | 12.9 | 1.7 | 1.23 | 0.02 | 52.0 | 0.4 | 13.5 | 0.6 |
| 4 | 1.45 | 0.02 | 43.0 | 0.9 | 11.3 | 0.9 | 1.26 | 0.07 | 52.1 | 2.5 | 12.6 | 1.5 | 1.21 | 0.03 | 52.0 | 1.3 | 19.8 | 1.8 |
| 5 | 1.46 | 0.08 | 42.8 | 3.0 | 11.1 | 1.8 | 1.24 | 0.02 | 52.6 | 0.9 | 18.1 | 1.9 | 1.20 | 0.03 | 41.6 | 3.0 | 17.4 | 1.3 |
| 6 | 1.48 | 0.04 | 41.9 | 1.7 | 13.7 | 1.7 | 1.27 | 0.06 | 50.0 | 2.5 | 12.6 | 1.6 | 1.28 | 0.02 | 49.9 | 1.0 | 14.1 | 1.6 |
| 7 | 1.41 | 0.01 | 46.7 | 0.6 | 11.3 | 0.7 | 1.16 | 0.03 | 54.8 | 0.9 | 19.7 | 1.1 | 1.05 | 0.03 | 55.6 | 2.0 | 20.9 | 2.0 |
| 9 | 1.29 | 0.04 | 47.5 | 1.7 | 15.5 | 1.1 | 1.16 | 0.06 | 52.7 | 2.5 | 17.3 | 1.5 | 1.17 | 0.04 | 52.1 | 1.8 | 19.2 | 1.2 |
| 13 | 1.32 | 0.05 | 48.4 | 2.1 | 10.1 | 1.4 | 1.20 | 0.04 | 53.1 | 1.7 | 16.9 | 1.4 | 1.15 | 0.04 | 54.8 | 2.9 | 21.7 | 2.5 |
| 15 | 1.39 | 0.07 | 46.6 | 2.5 | 13.5 | 1.2 | 1.18 | 0.04 | 53.7 | 1.5 | 19.1 | 1.1 | 1.19 | 0.03 | 53.7 | 1.1 | 22.5 | 1.0 |
| На глубине 10–20 см | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1.52 | 0.04 | 42.6 | 1.7 | 11.0 | 0.7 | 1.30 | 0.04 | 47.8 | 1.4 | 13.2 | 0.8 | 1.32 | 0.03 | 48.4 | 1.1 | 14.7 | 1.0 |
| 2 | 1.60 | 0.04 | 39.7 | 1.4 | 11.6 | 1.1 | 1.39 | 0.03 | 47.6 | 1.2 | 14.2 | 1.2 | 1.37 | 0.02 | 48.4 | 0.8 | 16.0 | 1.4 |
| 3 | 1.45 | 0.02 | 45.4 | 0.8 | 12.2 | 0.8 | 1.36 | 0.05 | 47.8 | 2.0 | 12.9 | 1.5 | 1.31 | 0.02 | 51.3 | 0.7 | 19.5 | 1.6 |
| 4 | 1.42 | 0.04 | 45.0 | 1.4 | 15.4 | 1.4 | 1.31 | 0.03 | 50.6 | 1.0 | 17.4 | 1.7 | 1.27 | 0.03 | 51.8 | 1.6 | 21.4 | 1.3 |
| 5 | 1.40 | 0.04 | 46.6 | 1.6 | 11.0 | 1.3 | 1.26 | 0.02 | 51.6 | 0.7 | 15.0 | 1.4 | 1.30 | 0.01 | 48.4 | 1.7 | 18.7 | 1.4 |
| 6 | 1.49 | 0.06 | 43.6 | 2.4 | 11.5 | 1.2 | 1.38 | 0.02 | 48.1 | 0.9 | 14.0 | 0.9 | 1.34 | 0.03 | 49.5 | 1.2 | 16.4 | 1.4 |
| 7 | 1.43 | 0.04 | 46.2 | 1.3 | 13.7 | 0.7 | 1.26 | 0.02 | 51.7 | 0.9 | 18.1 | 2.0 | 1.27 | 0.03 | 52.3 | 1.0 | 21.2 | 1.5 |
| 9 | 1.36 | 0.04 | 46.8 | 1.7 | 12.5 | 1.2 | 1.28 | 0.04 | 49.7 | 1.4 | 16.9 | 1.3 | 1.28 | 0.03 | 49.6 | 1.2 | 18.1 | 1.8 |
| 13 | 1.40 | 0.05 | 47.2 | 1.9 | 12.8 | 0.8 | 1.27 | 0.02 | 52.0 | 0.7 | 22.7 | 1.4 | 1.20 | 0.03 | 53.7 | 1.1 | 16.4 | 2.0 |
| 15 | 1.42 | 0.04 | 45.7 | 1.5 | 13.4 | 1.2 | 1.26 | 0.03 | 51.8 | 1.2 | 17.3 | 1.3 | 1.24 | 0.03 | 52.5 | 1.0 | 18.8 | 1.8 |

Обозначения: *BD* – плотность сложения почвы, г/см³; *P* – общая пористость, %; *Pa* – пористость аэрации, %; *M* – среднее значение; *m* – ошибка среднего, %

На части объектов исследования сильно отличается видовой состав на пасеках и волоках. Это прослеживается в первую очередь на волоках, где образовались колес с неблагоприятными физическими свойствами, которые заполнились водой, вследствие этого сформировалась значительная гетерогенность в условиях произрастания. На пасеках практически полностью сохраняется видовой состав напочвенного покрова, но с признаками стресса (изменения окраски листьев, уменьшения размера побегов и усыхания мохового покрова).

На старых вырубках отмечен наиболее гетерогенный видовой состав с видами, приуроченными к разным типам фитоценозов (лесным, луговым и нарушенным растительным сообществам). По волокам произрастает более 30 видов сосудистых растений (в коренном бореальном лесу в среднем насчитывается не более 15–20 сосудистых растений). На данном этапе сукцессии восстановления лесного фитоценоза формируется большое количество экологических ниш, что отражается на разнообразии жизненных форм.

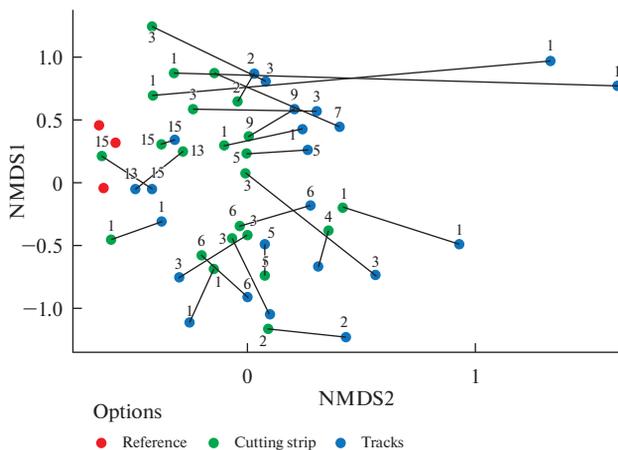


Рис. 1. Распределение объектов исследования в зависимости от прошедшего возраста после рубки и видового состава напочвенного покрова.

Fig. 1. Distribution of study sites depending on the past age after logging and the species composition of the ground cover.

На большинстве старых вырубок еще доминируют стресс-толеранты и рудералы, такие как *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, *C. angustifolium* (L.) Scop, *Aegopodium podagraria* L., *Stellaria holostea* L. (рис. 2).

Кроме них уже достаточно много типичных лесных бореальных видов и луговых (*Trifolium pratense* L., *T. repens* L., *Ranunculus repens* L., *R. propinquus* C.A. Mey., *Veronica longifolia* L., *Alchemilla subcrenata* Bus, *Vicia sepium* L. и др). Так же на видовой состав на волоках и доминирование отдельных видов травяно-кустарничкового яруса влияло увлажнение субстрата (уровень залегания грунтовых вод и степень проточности). При высокой влажности, волока покрыты *Polytrichum commune* L. Bryoid. Rbh. и *Sphagnum* sp., разрастаются представители рода *Carex* и *Equisetum*.

Возобновление хвойных и лиственных деревьев. Лесовозобновительный процесс на объектах исследования проходит неравномерно, что подтверждается математическими зависимостями ($R^2 = 0.20-0.75$), и который зависит от участка вырубки (рис. 3).

Наиболее успешно естественное лесовозобновление отмечается на пасаках, где отсутствовало прямое влияние техники. В колеях и межколеяных пространствах количество подроста в 2–7 раз меньше, чем на пасаках. Такое различие объясняется тем, что в технологических коридорах складываются неблагоприятные почвенные условия в колеях для роста и развития древесных пород. Местами на этих участках наблюдаются плотные слои порубочных остатков, которые защищают почвенный покров от чрезмерного уплотнения и колееобразования, но также препятствуют, долгое время, возобновлению леса.

В большинстве случаев сплошные вырубки обеспечиваются хвойным подростом, но лиственные породы (береза и осина) имеют в данных условиях преимущество. Для них складываются благоприятные световые условия, обильное плодоношение, вегетативное размножение, быстрый рост позволяют занимать доминирующее положение. Для устранения конкуренции со стороны лиственных и сохранения хвойных пород в составе, рекомендуется вести за ними рубки осветления и прочистки с ранних стадий формирования древостоев.

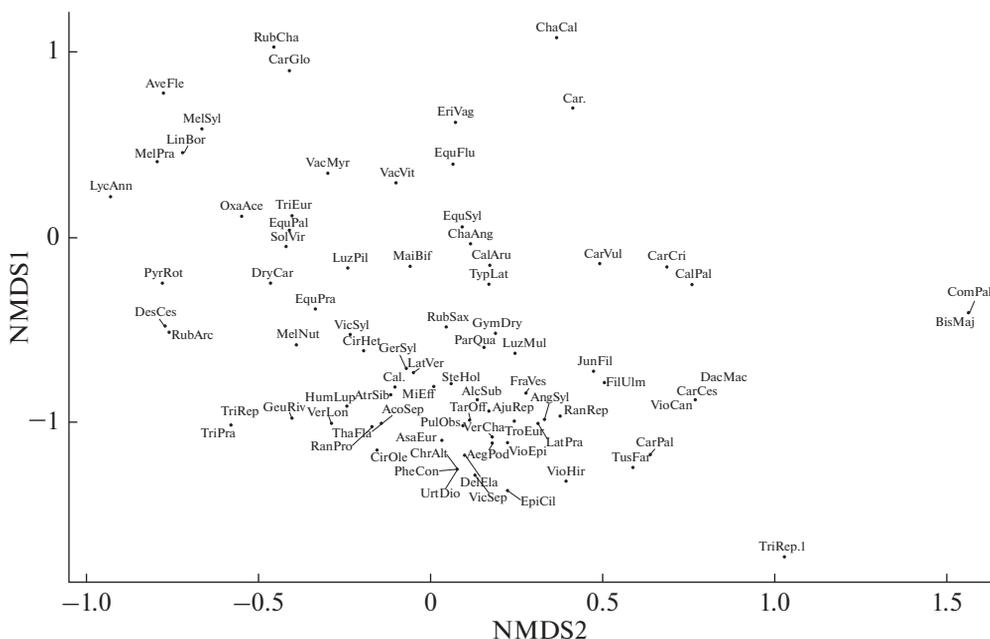


Рис. 2. Распределение флористического состава напочвенного покрова на объектах исследования.

Fig. 2. Distribution of the floral composition of the ground cover on the study sites.

ОБСУЖДЕНИЕ

При современной технологии заготовки древесины доля волоков (технологических коридоров) составляет до 30%. Именно на этих участках вырубок наблюдается повреждение почвы при транспортировке древесины груженными форвардерами. Укладывание порубочных остатков на волока в большинстве случаев позволяет избежать колееобразования и уплотнения почвы, но в тех местах, где количество порубочных остатков было недостаточно, наблюдаются глубокие колеи и высокие значения плотности сложения верхних горизонтов почвы (1.49–1.60 г/см³). Это объясняется несколькими причинами, тяжелая техника не только уплотняет почву, но и оттесняет верхние горизонты почвы, обнажая таким образом нижние минеральные горизонты обычно более высокой плотности [29]. Увеличение плотности сложения почвы, вызванное лесозаготовкой, в этом исследовании, было аналогичным или выше, чем значения, полученные в различных условиях [12, 14, 27, 31].

Большинство исследований показывают, что риск уплотнения почвы является самым высоким во влажном состоянии почвы [30, 33]. Сырая почва снижает несущую способность почв и более высокие нагрузки колес увеличивают глубину, на которой давление передается в почве, тем самым влияя на больший объем почвы. Уплотнение почвы изменяет и другие свойства [13, 19], которые влияют на функционирование почв. Нами обнаружено снижение общей пористости и пористости аэрации, которые напрямую зависят от плотности сложения. Так в колеях общая пористость находится на уровне 40%, что ниже чем на пасаках, где значения составляют более 50%. Снижение общей пористости предполагает ограничения в кислороде и водоснабжении для почвенных микроорганизмов и растений, с негативными последствиями для экологии почвы и продуктивность лесов [14]. Пористость аэрации в колеях составляет на

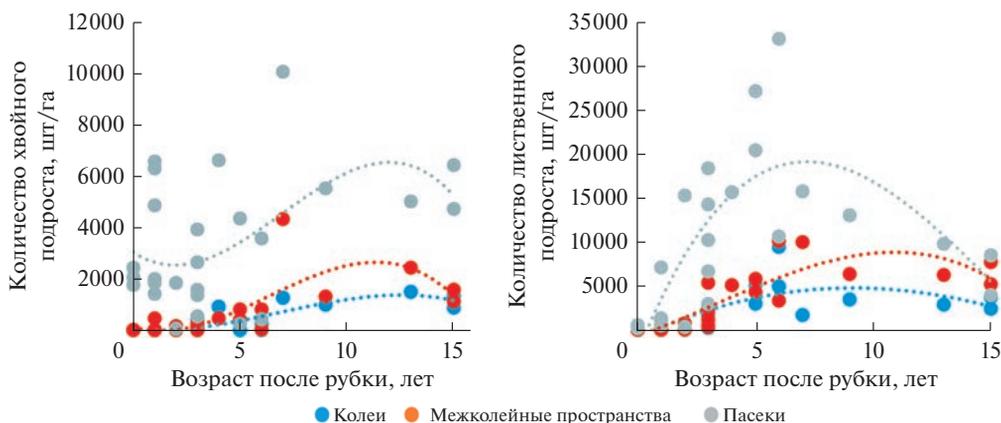


Рис. 3. Распределение количества подроста на объектах исследования в зависимости от прошедшего возраста после рубки.

Fig. 3. Distribution of the amount of undergrowth on the study sites, depending on the past age after logging.

уровне 8.7–15.5%, которая может оказать негативное влияние на функционирование корней растений. Как правило, корни растений функционируют на уровне кислорода более 10% [21, 26]. Полученные данные согласуются с данными полученными на вырубках в условиях таежной зоны [10]. Исследования различных авторов показывают, что большое значение для анализа процессов восстановления почвенного покрова имеет длительность периода после рубки [14, 19], что также отмечается в наших исследованиях. Восстановление растительного и почвенного покровов в местах повреждения связаны между собой. Поселение и успешный рост растительности зависит от почвенных факторов [32]. Однако темпы восстановительных сукцессий растительности и почв могут быть разными. Это связано с изменением не только физических, но и химических и биологических свойств почв, которые происходят в результате воздействия лесозаготовительной техники [1, 18, 19, 34].

Образующая гетерогенность условий, связанная с рубкой и проездом лесозаготовительной техники, влияет на состав нижних ярусов растительности, что отмечается во многих работах [2, 25, 35]. В местах проезда техники практически полностью уничтожается живой напочвенный покров, но уже через 1–2 года после рубки наблюдается внедрение новых видов. Удаление древесного полога приводит к заселению и разрастанию травянистой и злаковой растительности, включая внедрению заносных (случайных) видов [22, 28]. В большинстве описанных участков на смену доминантам зеленомошной группы леса выходят представители таких родов, как *p. Calamagrostis*, *p. Equisetum* *p. Carex* и *p. Chamaenerion*. Общее количество видов травяно-кустарничкового яруса сильно меняется на участках разных лет рубки. Это прослеживается не только в пределах колеи и междолейных пространствах, но и на пасеках. Удаление лесной подстилки в колеях, по-видимому, предоставляет возможность укорениться большему числу видов, вероятно, благодаря освобождению от конкуренции с предшествующей растительностью [16]. Неблагоприятные физические свойства, а также снижение плодородия верхнего слоя почвы из-за переноса питательных веществ после удаления живого напочвенного покрова [20], предполагает снижение конкуренции также в долгосрочной перспективе. Микроучастки оставшиеся после заготовки древесины, способствуют образованию участков с разнообразной растительностью.

Лесовозобновление на вырубках характеризуется большой неоднородностью. Прежде всего это связано с наличием колея различной глубины и захламления порубочными остатками [11, 19]. На волоках часто образуется сильно уплотненный перемешанный горизонт, состоящий из порубочных остатков и почвы, с неблагоприятными водно-физическими свойствами. По мнению различных исследователей [7, 10, 11], именно на участках с трансформированными почвами складывается наиболее неблагоприятная обстановка для лесовозобновления. Здесь плохо расселяются и хвойные, и лиственные древесные породы, а лесовозобновление нередко растягивается на 15 и более лет. Часто здесь первоначально образуются комплексы типичных пустырей, а в последующем – редин [11].

На всем рассматриваемом временном интервале, количество подроста на пасаках больше, чем на волоках. Связано это с тем, что во время рубки большая часть подроста предварительной генерации сохраняется и уже через 1–2 года после рубки мягколиственные породы активно возобновляются. Следует отметить, что данные породы менее требовательны, например, к физическим свойствам почвы, чем хвойные [19, 24]. Также на пасаках отсутствует прямое воздействие лесозаготовительной техники, которая может оказывать отрицательное влияние на последующее лесовозобновление путем изменения морфологических свойств почвы, а также ее физических, химических и биологических свойств. Ранее коллективом авторов [9] было отмечено, что на пасаках изменение физических свойств почвы в основном связано с вырубкой основного элемента древостоя, то есть с экологическими факторами лесной среды.

В таежной зоне большинство вырубок оставляется под естественное лесовозобновление. В качестве мер содействия естественному лесовозобновлению применяют оставление семенных деревьев, куртин, сохранение подроста и минерализацию поверхности почвы. Однако наши результаты, как и накопленный опыт [4, 11] показывают, что зачастую наблюдается неудовлетворительное лесовозобновление вырубок со сменой породного состава в пользу мягколиственных пород.

В рамках совершенствования системы устойчивого лесопользования [19, 23, 27] возрастает потребность в соответствующих и адаптированных методах смягчения негативных последствий лесозаготовительной техники на лесную почву. Для оперативного планирования в лесном хозяйстве должен быть разработан комплекс нормативно-рекомендательных инструментов с различными методами принятия решений. Это касается выбора системы заготовки древесины, организации лесозаготовительных работ с учетом природных особенностей, планирования сезона лесозаготовительных работ и технологии лесосечных работ, укрепления волоков порубочными остатками и др. Кроме этого, важное значение имеют технологические решения, включая подбор системы машин и механизмов, количество проездов техники по волокам, использование шин большего размера, регулирования давления в шинах, применение гусениц противоскольжения, оснащение техники компонентами навигации (GPS, ГЛОНАСС) совместно с ГИС-технологиями. Подобная система управленческих решений требует проведения комплексных научных исследований в различных регионах и типах лесорастительных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении заготовки древесины с применением системы многооперационных машин, в процессе транспортировки древесины происходит уплотнение почвы в колеях. При этом максимальное уплотнение наблюдается в первые годы после рубки. В последующие годы уплотнение почвы снижается, и к 15-ти летнему возрасту практически достигает показателей естественной почвы.

Восстановление живого напочвенного покрова на волоках происходит в течение 15-ти летнего периода после рубки. Процесс разрастания травяно-кустарничкового и

мохово-лишайникового ярусов на всех участках происходит интенсивно и способствует восстановлению почвенных свойств.

В первые годы на волоках складываются неблагоприятные условия для лесовозобновления, что связано с трансформацией почвенного покрова. Приоритет в заселении волоков часто приходится на листовенные породы, что вызывает необходимость принятия решений о создании лесных культур, либо потребует проведения рубок ухода в последующем для предотвращения смены пород.

Для обеспечения качественного естественного лесовозобновления требуется при планировании и проведении лесозаготовительных работ применение мер по снижению нарушений почвенного покрова на волоках.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает искреннюю благодарность к.с.-х.н. А.П. Богданову, к.с.-х.н. А.А. Парамонову и Ю.С. Быкову за помощь в сборе полевого материала, а также д.с.-х.н. Е.Н. Наквасиной, к.с.-х.н. И.Б. Амосовой и к.б.н. А.Г. Волкову за обсуждение и интерпретацию полученных результатов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук по проекту МК-2622.2021.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дымов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 3. С. 787–798.
2. Ильинцев А.С., Амосова И.Б., Третьяков С.В. Эколого-биологический анализ влияния различных видов рубок на структуру травяно-кустарничкового яруса черничных типов леса // Лесотехнический журнал. 2019. № 1. С. 31–43.
3. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 203 с.
4. Мелехов И.С. Лесоводство. 2-е изд., доп., испр. М.: МГУЛ, 2003. 302 с.
5. Наквасина Е.Н. Агрохимические свойства почв: учеб. пособие. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2009. 101 с.
6. Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. 2007–2022. [Электронный ресурс] URL: <https://www.plantarium.ru/> (дата обращения: 28.10.2022).
7. Резников А.И., Исаченко Г.А. Изменение климатических характеристик западной части тайги Европейской России в конце XX–начале XXI вв. // Известия Русского географического общества. 2021. Т. 153. № 1. С. 3–18.
8. Побединский А.В. Изучение лесовосстановительных процессов. М.: Наука, 1966. 64 с.
9. Сабо Е.Д., Кормилицына О.В., Бондаренко В.В. Виды и динамика уплотнения и разуплотнения почв на вырубках // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2012. № 3 (86). С. 42–46.
10. Серый В.С., Анисеева В.А., Вялых Н.И., Кубрак Н.И. Изменение лесорастительных условий вырубок при современных лесозаготовках // Экологические исследования в лесах Европейского Севера: Сб. науч. трудов. Архангельск, 1991. С. 3–15.
11. Цветков В.Ф. Камо Грядеши (Некоторые вопросы лесоводства и лесоведения на Европейском Севере). Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2000. 253 с.
12. Akay A.E., Yuksel A., Reis M., Tutus A. The impacts of ground-based logging equipment on forest soil // Polish Journal of Environmental Studies. 2007. V. 16. № 3. P. 371–376.
13. 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. V. 12. P. 113–118.
14. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. Impact of heavy traffic on forest soils: A review // Forest Ecology and Management. 2015. V. 338. P. 124–138.
15. Genikova N.V., Mamontov V.N., Kryshen A.M., Kharitonov V.A. et al. Natural Regeneration of the Tree Stand in the Bilberry Spruce Forest–Clear-Cutting Ecotone Complex in the First Post-Logging Decade // Forests. 2021. V. 12. P. 1–15.
16. Hart S.A., Chen H.Y. Understory vegetation dynamics of North American boreal forests // Critical Reviews in Plant Sciences. 2006. V. 25. № 4. P. 381–397.

17. *Hattori D., Tanaka K., Irino K.O., Kendawang J.J. et al.* Effects of soil compaction on the growth and mortality of planted dipterocarp seedlings in a logged-over tropical rainforest in Sarawak Malaysia // *Forest Ecology and Management*. 2013. V. 310. P. 770–776.
18. *Hume A.M., Chen H.Y.H., Taylor A.R.* Intensive forest harvesting increases susceptibility of northern forest soils to carbon, nitrogen and phosphorus loss // *Journal of Applied Ecology*. 2017. V. 00. P. 1–10.
19. *Ilitsev A.S., Nakvasina E.N., Högbom L.* Methods of Protection Forest Soils during Logging Operations (Review) // *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal]. 2021. № 5. P. 92–116.
20. *Jansons Ā., Robalte L., Čakšs R., Matisons R.* Long-term effect of whole tree biomass harvesting on ground cover vegetation in a dry Scots pine stand // *Silva Fennica*. 2016. V. 50. № 5. P. 1–8.
21. *Kozłowski T.T.* Soil compaction and growth of woody plants // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1999. V. 14. P. 596–619.
22. *MacLean D.A., Wein R.W.* Changes in understory vegetation with increasing stand age in New Brunswick forests: species composition, cover, biomass and nutrients // *Canadian Journal of Botany*. 1977. V. 55. P. 2818–2831.
23. *Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D. et al.* Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 634. P. 1385–1397.
24. *Mariotti B., Hoshika Y., Cambi M., Marra E. et al.* Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis // *Forest Ecology and Management*. 2020. V. 462. P. 1–9.
25. *Okland T., Rydgren K., Okland R.H., Storaunet K.O., Rolstad J.* Variation in environmental conditions, understory species number, abundance and composition among natural and managed *Picea abies* forest stands // *Forest Ecology and Management*. 2003. V. 177. P. 17–37.
26. *Osman K.T.* *Forest Soils: Properties and Management*. Springer International Publishing Switzerland, 2013. 217 p.
27. *Picchio R., Mederski P.S., Tavankar F.* How and How Much, Do Harvesting Activities Affect Forest Soil, Regeneration and Stands? // *Current Forestry Reports*. 2020. V. 6. P. 115–128.
28. *Roberts M.R., Zhu L.X.* Early response of the herba-ceous layer to harvesting in a mixed coniferous-deciduous forest in New Brunswick, Canada // *Forest Ecology and Management*. 2002. V. 155. P. 17–31.
29. *Schack-Kirchner H., Fenner P.T., Hildebrand E.E.* Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil deformation by logging machinery on a Ferralsol under native forest // *Soil Use and Management*. 2007. V. 23. № 3. P. 286–293.
30. *Sirén M., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Uusitalo J., Kiilo K.E.K., Salmivaara A., Ryyänen A.* Soil disturbance by cut-to-length machinery on mid-grained soils // *Silva Fennica*. 2019. V. 53. № 2. P. 1–24.
31. *Solgi A., Naghdi R., Marchi E., Laschi A., Keivan Behjou F., Hemmati V., Masumian A.* Impact Assessment of Skidding Extraction: Effects on Physical and Chemical Properties of Forest Soils and on Maple Seedling Growing along the Skid Trail // *Forests*. 2019. V. 10. № 2. P. 1–17.
32. *Susnjar M., Horvat D., Seselj J.* Soil compaction in timber skidding in winter conditions // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2006. V. 27. № 1. P. 3–15.
33. *Toivio J., Helmiisaari H.S., Palviainen M., Lindeman H., Ala-Ilomäki J., Sirén M., Uusitalo J.* Impacts of timber forwarding on physical properties of forest soils in southern Finland // *Forest Ecology and Management*. 2017. V. 405. P. 22–30.
34. *Worrell R., Hampson A.* The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils – a review // *Forestry*. 1997. V. 70. P. 61–85.
35. *Zenner E.K., Kabrick J.M., Jensen R.G., Peck J.E., Grabner J.K.* Responses of ground flora to a gradient of harvest intensity in the Missouri Ozarks // *Forest Ecology and Management*. 2006. V. 222. P. 326–334.

The Impact of Modern Logging on Soil Disturbance, the State of Ground Cover and the Subsequent Regeneration of Trees in Boreal Forests of Russia

A. S. Ilitsev*

Northern Research Institute of Forestry, Arkhangelsk, Russia

**E-mail: a.ilitsev@narfu.ru*

Abstract—The article presents materials for studying the physical properties of the upper horizons of the soil, the species diversity of the living ground cover and the natural regeneration of trees in 1–15 years old clear-cuttings. A noticeable compaction of the soil is observed in the ruts of the passage of machines, mainly in the thickness of the soil 0–10 cm, but not in

the between ruts sand the cutting strips. We found that the physical properties (bulk density, total porosity and aeration porosity) of the upper soil horizons depend on the age of cutting and the study site ($p < 0.01$). Soil compaction in the ruts decreases 9–15 years after logging to indicators in sites where the movement of machines was not carried out. The overgrowth of damaged sections in clear-cuts occurred through ruderal species and species with wide ecological amplitudes to environmental factors. This overgrowth stabilised 15 years after logging when the biodiversity level approached untouched stands. The regeneration of clear-cuts is mainly deciduous such as birch and aspen that mainly grew in the cutting strips. In the ruts and the between ruts, the amount of undergrowth is 2–7 times less than in cutting strips.

Keywords: clear-cuts, logging machinery, soil properties, grass-shrub layer, undergrowth

REFERENCES

1. Dymov A.A. Vliyaniye sploshnykh rubok v boreal'nykh lesakh Rossii na pochvy (obzor) // Pochvovedeniye. 2017. № 3. S. 787–798.
2. Ilyintsev A.S., Amosova I.B., Tret'yakov S.V. Ekologo-biologicheskij analiz vliyaniya razlichnykh vidov rubok na strukturu travyano-kustarnichkovogo yarusa chernichnykh tipov lesa // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2019. № 1. S. 31–43.
3. KurnaeV S.F. Lesorastitel'noe rajonirovaniye SSSR. M.: Nauka, 1973. 203 s.
4. Melekhov I.S. Lesovodstvo. 2-e izd., dop., ispr. M.: MGUL, 2003. 302 s.
5. Nakvasina E.N. Agrohimicheskie svoystva pochv: ucheb. posobie. Arhangel'sk: Arhangel. gos. tekhn. un-t, 2009. 101 s.
6. Plantarium. Rasteniya i lishajniki Rossii i sopredel'nykh stran: otkrytyj onlajn atlas i opredelitel' rastenij. 2007–2022. [Elektronnyj resurs] URL: <https://www.plantarium.ru/> (data obrashcheniya: 28.10.2022).
7. Pobedinskij A.V. Izuchenie lesovosstanovitel'nykh processov. M.: Nauka, 1966. 64 s.
8. Reznikov A.I., Isachenko G.A. Izmeneniye klimaticheskikh harakteristik zapadnoj chasti tajgi Evropejskoj Rossii v konce XX–nachale XXI vv. // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva. 2021. T. 153. № 1. S. 3–18.
9. Sabo E.D., Kormilicyna O.V., Bondarenko V.V. Vidy i dinamika uplotneniya i razuplotneniya pochv na vyrubkakh // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik. 2012. № 3 (86). S. 42–46.
10. Seryj V.S., Anikeeva V.A., Vyalyh N.I., Kubrak N.I. Izmeneniye lesorastitel'nykh uslovij vyrubok pri sovremennykh lesozagotovkakh // Ekologicheskije issledovaniya v lesakh Evropejskogo Severa: Sb. nauch. trudov. Arhangel'sk, 1991. S. 3–15.
11. Cvetkov V.F. Kamo Gryadeshki (Nekotorye voprosy lesovodstva i lesovedeniya na Evropejskom Severe). Arhangel'sk: Izd-vo Arhangel. gos. tekhn. un-ta, 2000. 253 s.
12. Akay A.E., Yuksel A., Reis M., Tutus A. The impacts of ground-based logging equipment on forest soil // Polish Journal of Environmental Studies. 2007. Vol. 16, № 3. P. 371–376.
13. 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. P. 113–118.
14. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. Impact of heavy traffic on forest soils: A review // Forest Ecology and Management. 2015. Vol. 338. P. 124–138.
15. Genikova N.V., Mamontov V.N., Kryshen A.M., Kharitonov V.A. et al. Natural Regeneration of the Tree Stand in the Bilberry Spruce Forest–Clear-Cutting Ecotone Complex in the First Post-Logging Decade // Forests. 2021. Vol. 12. P. 1–15.
16. Hart S.A., Chen H.Y. Understory vegetation dynamics of North American boreal forests // Critical Reviews in Plant Sciences. 2006. Vol. 25. № 4. P. 381–397.
17. Hattori D., Tanaka K., Irino K.O., Kendawang J.J. et al. Effects of soil compaction on the growth and mortality of planted dipterocarp seedlings in a logged-over tropical rainforest in Sarawak Malaysia // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 310. P. 770–776.
18. Hume A.M., Chen H.Y.H., Taylor A.R. Intensive forest harvesting increases susceptibility of northern forest soils to carbon, nitrogen and phosphorus loss // Journal of Applied Ecology. 2017. Vol. 00. P. 1–10.
19. Ilyintsev A.S., Nakvasina E.N., Högbom L. Methods of Protection Forest Soils during Logging Operations (Review) // Lesnoj Zhurnal [Russian Forestry Journal]. 2021. № 5. P. 92–116.
20. Jansons Ā., Robalte L., Čakšs R., Matisons R. Long-term effect of whole tree biomass harvesting on ground cover vegetation in a dry Scots pine stand // Silva Fennica. 2016. Vol. 50. № 5. P. 1–8.
21. Kozlowski T.T. Soil compaction and growth of woody plants // Scandinavian Journal of Forest Research. 1999. Vol. 14. P. 596–619.

22. MacLean D.A., Wein R.W. Changes in understory vegetation with increasing stand age in New Brunswick forests: species composition, cover, biomass and nutrients // *Canadian Journal of Botany*. 1977. Vol. 55. P. 2818–2831.
23. Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D. et al. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 634. P. 1385–1397.
24. Mariotti B., Hoshika Y., Cambi M., Marra E. et al. Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis // *Forest Ecology and Management*. 2020. Vol. 462. P. 1–9.
25. Okland T., Rydgren K., Okland R.H., Storaunet K.O., Rolstad J. Variation in environmental conditions, understorey species number, abundance and composition among natural and managed *Picea abies* forest stands // *Forest Ecology and Management*. 2003. Vol. 177. P. 17–37.
26. Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Springer International Publishing Switzerland, 2013. 217 p.
27. 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. P. 115–128.
28. Roberts M.R., Zhu L.X. Early response of the herbaceous layer to harvesting in a mixed coniferous-deciduous forest in New Brunswick, Canada // *Forest Ecology and Management*. 2002. Vol. 155. P. 17–31.
29. Schack-Kirchner H., Fenner P.T., Hildebrand E.E. Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil deformation by logging machinery on a Ferralsol under native forest // *Soil Use and Management*. 2007. Vol. 23. № 3. P. 286–293.
30. Sirén M., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Uusitalo J., Kiilo K.E.K., Salmivaara A., Rynänen A. Soil disturbance by cut-to-length machinery on mid-grained soils // *Silva Fennica*. 2019. Vol. 53. № 2. P. 1–24.
31. Solgi A., Naghdi R., Marchi E., Laschi A., Keivan Behjou F., Hemmati V., Masumian A. Impact Assessment of Skidding Extraction: Effects on Physical and Chemical Properties of Forest Soils and on Maple Seedling Growing along the Skid Trail // *Forests*. 2019. Vol. 10. № 2. P. 1–17.
32. Susnjar M., Horvat D., Seselj J. Soil compaction in timber skidding in winter conditions // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2006. Vol. 27. № 1. P. 3–15.
33. Toivio J., Helmisaari H.S., Palviainen M., Lindeman H., Ala-Ilomäki J., Sirén M., Uusitalo, J. Impacts of timber forwarding on physical properties of forest soils in southern Finland // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 405. P. 22–30.
34. Worrell R., Hampson A. The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils – a review // *Forestry*. 1997. Vol. 70. P. 61–85.
35. Zenner E.K., Kabrick J.M., Jensen R.G., Peck J.E., Grabner J.K. Responses of ground flora to a gradient of harvest intensity in the Missouri Ozarks // *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 222. P. 326–334.