

DOI 10.31509/2658-607x-202252-116
УДК 630*907.1

ВЛИЯНИЕ ЛЕСОВОДСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ПОЧВЕННЫЙ УГЛЕРОД: ОБЗОР

© 2022 г.

Д. Н. Тебенькова*, Д. В. Гичан, Ю. Н. Гагарин

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32*

E-mail: tebenkova.dn@gmail.com

Поступила в редакцию: 20.11.2022

После рецензирования: 18.12.2022

Принята к печати: 20.12.2022

В работе приводится обзор российских и зарубежных статей, посвященных изучению влияния лесоводственных мероприятий на пул почвенного углерода для оценки эффективности лесоклиматических проектов. Проведенный анализ работ позволяет заключить, что лесоводственные мероприятия влияют на содержание почвенного углерода через изменение скорости поступления и разложения органического вещества и, как следствие, влияют на перераспределение углерода в профиле почв. Рубка высокой интенсивности, в том числе сплошная, уборка порубочных остатков, повреждение напочвенного покрова при посадке лесных культур, создание монокультур могут отрицательно влиять на пул углерода почв. Напротив, выборочные рубки и рубки ухода слабой интенсивности, оставление порубочных остатков, создание смешанных лесных плантаций, особенно на заброшенных сельскохозяйственных землях, являются перспективными лесохозяйственными приемами, которые способствуют накоплению и сохранению углерода почв.

Ключевые слова: *углерод, почва, лесные климатические проекты, лесоводственные мероприятия*

В 2019 г. Российская Федерация ратифицировала Парижское соглашение по климату, которое в свою очередь пришло на смену Киотскому протоколу. В настоящее время соглашение является основным регулирующим механизмом по снижению содержания углекислого газа (CO₂) в атмосфере. Оно признает лес одним из важнейших поглотителей и накопителей парниковых газов, требующим особого внимания и охраны со стороны государств —

членов соглашения (Парижское соглашение, 2015). В России для достижения целей Парижского соглашения в 2021 г. утверждена Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. Целью Стратегии заявлено достижение углеродной нейтральности при устойчивом росте экономики. Ее реализация планируется в том числе за счет роста поглощающей способности лесов в результате совер-

шенствования практик управления, лесопользования, лесовосстановления и лесоразведения. В связи с этим большую популярность приобретают лесоклиматические проекты, направленные на усиление углероддепонирующей функции лесных экосистем. К тому же лесовосстановление и другие виды биологического связывания углерода относятся к числу наименее затратных подходов к сокращению выбросов парниковых газов (Gillingham, Stock, 2018).

Лесоклиматические проекты — это комплекс мероприятий, обеспечивающих сокращение (предотвращение) выбросов парниковых газов или увеличение их поглощения с учетом поглощающей способности лесов и иных экосистем (Законопроект № 1116605-7). По расчетам КПМГ (KPMG International Limited), с учетом данных Института глобального климата и экологии, потенциал лесоклиматических проектов по сокращению выбросов парниковых газов в России составляет до 40–45% среди всех других направлений секвестрации парниковых газов (360–420 млн т CO_2 экв. год⁻¹) (Специальные лесоклиматические проекты..., 2021).

Аргументом в пользу того, что леса уменьшают концентрацию CO_2 в атмосфере, является то, что живые деревья поглощают CO_2 из атмосферы, формируя в ходе фотосинтеза органические соединения и выделяя кислород в атмосферу. Леса сохраняют углерод в растительности и почвах на длительное время, что обуславливает их преимущество по сравнению

с агроценозами, где происходит быстрый возврат углерода в биологические циклы. Каждая тонна углерода, хранящегося в древесине, соответствует удалению из атмосферы 3.67 т CO_2 (Oliver et al., 2014).

Показано, что скорость роста деревьев снижается с возрастом, а древесина мертвых лесных деревьев разлагается с выделением CO_2 , который выбрасывается обратно в атмосферу (Oneil, Lippke, 2010). Поэтому было сделано заключение о том, что в стареющих лесах скорость поглощения CO_2 замедляется. Так, данные инвентаризации лесов Западной Австралии показывают, что темпы роста начинают замедляться к пятому десятилетию с небольшим дальнейшим ростом к девятому десятилетию, поскольку смертность одних деревьев компенсируется ростом других (FIA, 2020; Lippke et al., 2020). Тем не менее, рационально обоснованные режимы рубок при условии консервирования углерода в долгоживущих изделиях из древесины могут способствовать непрерывному поглощению углерода. К таким режимам относят рубку в период, когда древостой близок к максимальной скорости роста, а объемы заготовки не превышают величину годового прироста. Типичный пример устойчиво управляемых лесов Западной Австралии показывает, что каждый гектар деревьев, посаженных в 2000 г., через 23 года поглотил примерно 45 т углерода из атмосферы, к середине первого оборота рубки из атмосферы удалено 165 т CO_2 . К концу первой рота-

ции в возрасте 45 лет было абсорбировано 180 т углерода в древесине и 660 т CO_2 были удалены из атмосферы в результате роста деревьев. Из 180 т углерода 75 т хранились в долгоживущих изделиях из древесины и сопутствующих продуктах, 30 т — в недолговечных бумажных изделиях, 60 т — в порубочных остатках и 15 т — в биотопливе. В результате суммарные выбросы от сжигания ископаемого топлива от всех источников уменьшилась с 20.4 до 5.4 т углерода (Lippke et al., 2021).

Для оценки трансформации углерода при проведении рубок лесных насаждений важно понимать пути дальнейшего использования лесоматериалов. При производстве долгоживущих материалов из древесины углерод не возвращается в атмосферу, как следствие не происходит эмиссии CO_2 . Материалы с коротким жизненным циклом, например биотопливо, древесная щепа, целлюлозно-бумажная продукция, способствуют быстрой эмиссии CO_2 . По мнению Б. Г. Федорова (2017), рубка лесных насаждений должна рассматриваться не как эмиссия CO_2 , а как омоложение вырубленной территории — увеличение чистой экосистемной продукции (NEP), а окисление древесины и древесной продукции следует учитывать уже по мере её использования потребителем.

Климаторегулирующая роль лесов не ограничивается депонированием углерода в древесине. Общие запасы углерода в почве (включая подстилку) составляют примерно 70% запасов углерода экосистемы

в бореальных лесах, примерно 60% в лесах умеренного пояса и примерно 30% в тропических лесах соответственно (Pan et al., 2011). В старовозрастных лесах это значение доходит до 90% (Johnson et al., 2010). Суммарно для России запасы углерода почв в слоях 0–30 см, 0–50 см и 0–100 см оценены в 128.4×10^9 т, 166.5×10^9 т и 215.8×10^9 т. Для слоя 0–100 см средние запасы — 162 ± 23 т С га⁻¹ (Честных и др., 2022). С одной стороны, деятельность по управлению земельными ресурсами с целью получения древесного сырья для замены углеродоёмких производств может увеличить потери углерода посредством нарушения почв, уменьшения прочности агрегатов, увеличения числа пожаров и сокращения растительного покрова. С другой стороны, объем поглощаемого углерода увеличивается, если применяются методы лесопользования, при которых добавляется большее количество биомассы в почву, уменьшается повреждение почвы, сохраняется влага, улучшается структура почв и повышается активность почвенной биоты. Несмотря на размеры запасов углерода в почве, роль почвенного углерода в прошлом часто игнорировалась или недооценивалась во многих инициативах по изменению климата.

Увеличение спроса на высококачественные экологические углеродные кредиты может опережать их предложение, о чем свидетельствует увеличение на 60% средней цены компенсации выбросов углерода, связанной с природными решениями, в 2021 г. по сравнению с предыду-

щим годом, достигнув средней цены по миру в 4 долл. США за тонну (Donofrio et al., 2022). Узкое место в реализации углеродных проектов — неопределенности, связанные с реакцией почв на проектную деятельность, которые могут иметь решающее значение для поддержки и обоснования инвестиционных решений как по защите существующих запасов углерода (например, защита малонарушенных лесов), так и по формированию новых запасов углерода (например, лесовосстановление). Если задачей управления лесными ресурсами является значительное уменьшение последствий изменения климата, следует лучше изучить влияние различных видов лесоводственных мероприятий на уровень почвенного углерода и рекомендовать наиболее эффективные меры для лесоклиматических целей.

Цель настоящей статьи — рассмотреть влияние различных лесоводственных мероприятий на пул углерода почв с точки зрения эффективности их использования для лесоклиматических проектов.

1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЛЕСОКЛИМАТИЧЕСКИМ ПРОЕКТАМ

Для оценки эффективности тех или иных мер в отношении депонирования углерода необходимо дать анализ требований к лесоклиматическим проектам. Основными требованиями к лесоклиматическим проектам являются дополнительность, постоянство и отсутствие утеч-

ки (The Greenhouse Gas Protocol..., 2006; Verified Carbon Standard, 2022, Шанин и др., 2022).

Дополнительность предполагает, что при выполнении проекта будет происходить большее поглощение парниковых газов, чем без его реализации. Чтобы оценить такую «дополнительность проекта», необходимо разработать базовую линию (сценарий обычного развития событий, или эталонный сценарий), которая чаще всего содержит обязательные требования текущего законодательства, и сценарий проекта. Единицы сокращения выбросов в результате выполнения проекта рассчитываются как разница между результатами проектной деятельности и базовой линией. Единицы, которые не отражают реальное сокращение выбросов, называют ложными. Они могут появляться, например, если в проекте не учитывается или неверно определена базовая линия. Дополнительность является ключом к обеспечению того, чтобы ложные углеродные единицы не ставили под угрозу глобальные углеродные рынки (Michaelowa et al., 2019). Если страны или любой другой субъект используют ложные единицы для выполнения своих обязательств по компенсации выбросов, это приведет к общему увеличению выбросов, а не к их сокращению. Таким образом, дополнительность является гарантией целостности окружающей среды.

Принцип постоянства требует, чтобы результаты проекта по удалению парни-

ковых газов сохранялись длительное время (как минимум 100 лет). Чтобы продемонстрировать постоянство, необходимо проводить сторонний мониторинг результатов проекта, сроки которого зависят от типа проекта (раз в 5 лет, ежегодно).

Утечка в лесоклиматических проектах — это уменьшение или увеличение секвестрации парниковых газов за пределами географических границ проекта, которое прямо или косвенно связано с реализацией проекта (Atmadja, Verchot, 2012; Streck, 2021). Утечка может быть как положительной, так и отрицательной. В первом случае она усиливает сокращение выбросов парниковых газов за счет положительных эффектов вытеснения. Например, в горных областях облесение территории проекта способствовало уменьшению эрозии на соседнем нижележащем по склону участке, за счет чего стало происходить большее депонирование углерода в почве. Хотя эффекты от положительных утечек могут быть существенными, они, по понятным причинам, не являются предметом каких-либо споров. Во втором случае утечка снижает секвестрацию выбросов, что делает проект неэффективным, перемещая выбросы в другое место, не сокращая их. Отрицательная утечка переносит нагрузку с одного района на другой. Она может быть вызвана в том числе перемещением людей, технологий или капитала. Например, запрет на рубку в одном месте приводит к увеличению объемов рубки в другом. В зависимости от того, являют-

ся ли события, которые привели к эффектам смещения, прямыми или косвенными, можно различать первичную или вторичную утечку (Auckland et al., 2003). Чтобы лесоклиматический проект считался эффективным, необходимо единовременное выполнение всех требований.

2. ВЛИЯНИЕ ЛЕСОВОДСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ПУЛ УГЛЕРОДА В ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ

В лесных экосистемах аспекты управления (рубка, уборка порубочных остатков, уход за лесом, лесовосстановление, внесение удобрений, охрана и защита леса и др.) могут повлиять на хранение почвенного углерода. Такая деятельность влияет на запасы почвенного углерода через изменение скорости поступления и разложения органического вещества. Далее представлен краткий обзор влияния основных лесоводственных мероприятий, которые могут быть элементами лесоклиматических проектов, на пул углерода почв.

2.1. Рубки лесных насаждений

Лесозаготовительные мероприятия являются одним из главных антропогенных факторов, изменяющих лесные почвы (Дымов, 2017). Сплошные рубки представляют собой наиболее распространенную во всем мире практику лесозаготовок, в целом имеющую негативные последствия для запасов углерода в почве. Поте-

ри углерода в почве после сплошной рубки могут быть связаны в основном с уменьшением поступления углерода (т. е. опада) и/или увеличением скорости разложения и как следствие — характером возобновления растений напочвенного покрова и древесного яруса. Было высказано предположение, что более высокая инсоляция и более теплые, благоприятные микроклиматические условия почвы стимулируют микробное дыхание после удаления древесного полога (Pumpanen et al., 2004; Kulmala et al., 2014; Mayer et al., 2017). Почвы вырубок теплее почв хвойных лесов, но при этом для почв вырубок выше суточная амплитуда колебаний температур (Дымов, Старцев, 2016). Однако также было продемонстрировано, что ферментативные процессы, участвующие в расщеплении органического вещества и разложении подстилки, могут оставаться неизменными или снижаться после сплошных рубок (Cardenas et al., 2015; Kohout et al., 2018). Более низкая ферментативная активность связана с уменьшением корневого опада, основную долю которого составляют тонкие корни, и с изменениями в микробном сообществе почвы (Kohout et al., 2018). Согласно метаисследованию (Holden, Treseder, 2013), сплошная рубка снижает микробную и грибную биомассу на 14–33% и 20–40% соответственно, оказывая меньшее воздействие, чем лесной пожар, но большее, чем вспышки численности насекомых. К тому же уменьшение влажности в поверхностных слоях почвы

снижает скорость разложения подстилки (Prescott et al., 2000). С другой стороны, благодаря уменьшению транспирации в результате рубки древостоя возрастает содержание влаги в нижних слоях почвы. Показано, что при рубках в средней и северной тайге Республики Коми происходит изменение соотношения поверхностного и подземного стока, а также режимов постоянных водотоков и внутригодового перераспределения стока (Трансформация..., 1996). Ускоренная эрозия, выщелачивание и сход лавин также могут способствовать уменьшению запасов углерода в почве после рубки леса (Katzensteiner, 2003). Перемещенный углерод депонируется в другом месте (Hoffmann et al., 2013), что противоречит принципу утечки. Интенсивность проявления отдельных элементарных почвообразовательных процессов зависит в первую очередь от типа леса, состава растений напочвенного покрова и древесного яруса, типа и гранулометрического состава почв, климатических условий зоны (Дымов, 2017).

Сплошные рубки снижают запас почвенного углерода до 10% во всем почвенном профиле с наибольшей потерей в лесной подстилке (Johnson, Curtis, 2001; Achat et al., 2015). Проведенный метаанализ (Nave et al., 2010) исследований для лесов умеренного пояса показал, что лесозаготовки снижают запас углерода в почве в среднем на 8%: запасы углерода в лесной подстилке снизились на 30%, в то время как минеральные горизонты

не показали значительных общих изменений. Потери углерода в лесной подстилке были выше в лиственных лесах (-36%), чем в хвойных или смешанных лесах (-20%) Согласно другому метаанализу (James, Harrison, 2016), лесозаготовки сокращают запасы углерода в почве в среднем на 11.2%, при этом наибольшие потери происходят в органических горизонтах (-30.2%). Меньшие потери происходят в верхнем минеральном слое почвы (глубина 0–15 см; -3.3%) и глубоких слоях почвы (60–100 см; -17.7%). Исследования хронологической последовательности и метаанализ показывают, что запасы почвенного углерода в лесной подстилке и минеральной почве начинают восстанавливаться через 10–50 лет после рубки древостоя (Tang et al., 2009; Nave et al., 2010; Achat et al., 2015; James, Harrison, 2016).

Выборочная рубка, при которой сохраняются живые деревья, может уменьшить потери почвенного углерода, связанные с лесозаготовками. Струкель с соавторами (Strukelj et al., 2015) показали, что в условиях бореальных лесов Канады через 9 лет после сплошной рубки осины участок стал источником углерода, а частично вырубленные насаждения стали поглотителем углерода. В насаждениях с преобладанием ели европейской (*Picea abies*) в Австрии выборочные рубки привели к увеличению запасов почвенного углерода в верхней части минеральной почвы на 11% по сравнению с традиционной сплошной рубкой при достижении возраста спелости

(Pötzelsberger, Hasenauer, 2015). Выборочные рубки в лесах нотофагуса низкого (*Nothofagus pumilio*) в чилийской Патагонии привели лишь к кратковременным потерям почвенного углерода (Klein et al., 2008). Сообщается об уменьшении запасов почвенного углерода в минеральной почве и о нейтральном воздействии на слой подстилки после заготовки лесоматериалов в дубовом лесу в Новой Англии (Warren, Ashton, 2014). Тем не менее, другие исследователи обнаружили небольшую разницу или отсутствие различий между эффектами выборочной и сплошной рубок на запасы углерода в почве (Hoover, 2011; Christophel et al., 2015; Puhlick et al., 2016). Однако следует отметить, что изменение пула углерода в почве после рубки происходит в течение десятилетий и даже столетий (Achat et al., 2015; James, Harrison, 2016), но в большинстве исследований изучается изменение почвенного углерода в течение 15 лет после рубки. Для восполнения этого пробела необходимо создание и поддержание долгосрочных исследовательских участков в различных типах лесных экосистем (Clarke et al., 2015). Кроме того, восполнить пробелы в долгосрочных оценках запасов почвенного углерода возможно с помощью методов математического моделирования.

Модель Romul_Hum (Komarov et al., 2017, Комаров и др., 2017; Chertov et al., 2017a, 2017b) описывает трансформацию (минерализацию и гумификацию) почвенного органического вещества в зависимо-

сти от его химических свойств и погодных условий почвы. Результаты моделирования представлены в ряде статей (Kalinina et al., 2018; Shanin et al., 2021; Шанин и др., 2022). В настоящий момент большинство имитационных экспериментов с использованием модели проведены для объектов в бореальной зоне, но ее возможно параметризовать для хвойно-широколиственных лесов. Благодаря интеграции модели Romul_Hum со статистическим генератором почвенного климата SCLISS (Быховец, Комаров, 2002) существует возможность моделирования при различных сценариях изменения климата. Также обе вышеназванные модели вместе с динамической моделью древостоя FORRUS-S (Чумаченко, 1993; Chumachenko et al., 2003), моделью BioCalc (Ханина и др., 2006; Khanina et al., 2007, 2014), прогнозирующей динамику видового разнообразия живого напочвенного покрова лесных территорий, моделью испарения с лесных массивов EVAPROF (Карпечко, 2016; Кондратьев и др., 2019), гидрологической моделью формирования стока с водосбора ИЛНМ (Кондратьев, Шмакова, 2005; Кондратьев, 2007), моделью формирования биогенной нагрузки на водные объекты ИЛЛМ (Кондратьев, 2007; Кондратьев и др., 2011; Behrendt, Dannowski, 2007) объединены в систему моделей RUF OSS (Чумаченко и др., 2020) для оценки компромиссов и синергии между экосистемными услугами лесов.

2.2. Удаление порубочных остатков

Порубочные остатки представляют собой смесь компонентов деревьев с низкой товарной стоимостью, которые остаются на лесосеке после рубки. Они состоят из листьев / хвои, веток, некачественных стволов или стволов небольшого диаметра, коры, сухостоя, пней и корней. Остатки содержат углерод и могут оказывать воздействие на накопление/потери углерода косвенно, например через влияние на микробные сообщества (Mushinski et al., 2019) и почвенный микроклимат (Devine, Harrington, 2007). Современный спрос на возобновляемые источники энергии (например, топливную древесину) повысил интерес к использованию порубочных остатков. Биомасса в настоящее время представляет собой крупнейший возобновляемый источник энергии, и большинство путей МГЭИК, ограничивающих глобальное потепление до 1.5 °С, включают более широкое использование биомассы для производства энергии (De Coninck et al., 2018). Удаление порубочных остатков с участка влияет на запасы углерода в почве, поэтому фактический баланс углерода при замене ископаемого топлива порубочными остатками для производства энергии должен учитывать эти возможные изменения.

В литературе встречаются неоднозначные выводы влияния уборки порубочных остатков на запасы углерода в почве, чаще всего сообщается об их снижении. Например, обнаружено, что вывоз

остатков приводит к уменьшению (–6%) запасов углерода в почве, тогда как их сохранение увеличивает запасы почвенного углерода (Johnson, Curtis, 2001). Проведенный метаанализ (Achat et al., 2015) показал, что удаление порубочных остатков приводит к значительным потерям запасов почвенного углерода в лесной подстилке (от 10% до 45%) и даже в слоях почвы глубиной более 20 см (10%) и что вывоз остатков оказывает большее влияние в умеренных, чем в холодных (бореальных) лесах. Запасы углерода в лесной подстилке также сокращаются с увеличением интенсивности лесозаготовок (–24% при уборке порубочных остатков). Таким образом, вывоз остатков приводит к потере в среднем 11% углерода всего почвенного профиля.

Также часто сообщается об отсутствии эффекта уборки порубочных остатков. В обзорах (Johnson, Curtis, 2001; Thiffault et al., 2011; Clarke et al., 2015) не найдено четких доказательств общего снижения содержания углерода в почве после удаления древесных остатков. Кроме того, на сорокадцати экспериментальных участках, которые входят в сеть долгосрочного мониторинга продуктивности почвы, в Канаде (Morris et al., 2019) и в Европе (Walmsley et al., 2009) не было обнаружено явного влияния удаления остатков на запасы почвенного углерода в течение 20 лет после рубки.

В скандинавских странах широко распространено использование пней. Поле-

вые исследования заготовки пней в этих странах либо не выявили снижения запасов почвенного углерода в минеральных почвах (Strömberg et al., 2013; Jurevics et al., 2016), либо выявили лишь небольшое снижение (Huvönen et al., 2016; Vanguelova et al., 2017). Однако удаление пней привело к сокращению запасов почвенного углерода на 24% в лесу умеренного пояса в Вашингтоне, США (Zabowski et al., 2008). В центральной Швеции на участках, где проводилась уборка пней, было обнаружено значительно более низкое содержание почвенного углерода в гумусовом слое по сравнению с участками, где проводилась скарификация (Persson et al., 2017). Воздействие удаления пней на пул углерода выше для органических почв, чем для минеральных. Например, в торфяных почвах Уэльса с высоким содержанием органического вещества до 50% общего углерода в толще 0–80 см было потеряно в течение первых четырех лет после заготовки пней (Vanguelova et al., 2017).

Для вырубок характерно залповое поступление остатков древесины в виде порубочных остатков, крупных древесных остатков, в том числе пней, сохраняющихся достаточно длительное время, которое формирует органическое вещество почв. Показано, что в условиях средней тайги Республики Коми уже в 40-летних вторичных березняках валеж практически полностью отсутствует (Дымов, 2017).

2.3. Посадка лесных культур

Общепризнанными подходами к связыванию углерода сегодня являются и лесовосстановление, и лесовыращивание, в том числе плантационное. Результаты анализа влияния посадки лесных культур на углерод почвы весьма разнообразны, поскольку почвы могут получать углерод, не претерпевать изменений или даже терять углерод после облесения (Guo, Gifford, 2002; Vesterdal et al., 2002). Тем не менее, в большинстве обзоров представлены первоначальные потери углерода с последующим небольшим увеличением. Потеря углерода может происходить в течение короткого периода после облесения, когда существует дисбаланс между потерей углерода в результате микробного дыхания почвы и поступлением углерода в результате опада. Посадка приводит к нарушению почвы и может стимулировать минерализацию почвенного органического вещества. Несколько исследований, в которых сравнивались различные методы подготовки участка, показали, что потери почвенного углерода увеличиваются с возрастанием интенсивности нарушения почвы (Schmidt et al., 1996; Mallik, Hu, 1997). Песчаные почвы особенно чувствительны к нарушению (Carlyle, 1993). Эти потери не обязательно компенсируются поступлением углерода с опадом на молодой плантации из-за его низкого объема. Экспериментальные данные подтверждают эту теорию. Прирост углерода в верхней минеральной почве плантационных

лесов может быть компенсирован потерями старого углерода из более глубоких частей почвы (Paul et al., 2002; Vesterdal et al., 2002). В экспериментах в Южной Каролине с ладанной сосной (*Pinus taeda*) 80% накопления углерода произошло в биомассе, некоторое накопление было обнаружено в лесной подстилке и лишь небольшое количество аккумулировалось в минеральной почве (Richter et al., 1999). Первоначальное накопление углерода происходит в лесной подстилке. Условия, не способствующие микробным процессам в почве, такие как песчаный состав, низкая доступность питательных веществ и низкий уровень pH, могут привести к образованию мощного слоя лесной подстилки (Vesterdal et al., 1995; Vesterdal, Raulund-Rasmussen, 1998). Ее мощность и химические свойства варьируют также в зависимости от породного состава насаждений (Vesterdal, Raulund-Rasmussen, 1998).

Особое значение имеет выбор древесных пород для лесовосстановления. Согласно метаанализу (Laganiere et al., 2010), среднее увеличение запасов почвенного углерода через 20-30 лет после облесения широколиственными видами составило 25%. Для сравнения, для хвойных видов увеличение за тот же период составляет 2%. Запасы почвенного углерода в лесной подстилке обычно больше под хвойными, чем под широколиственными видами деревьев (Vesterdal et al., 2013; Воџа et al., 2014), в то время как в минеральной толще наоборот (Vesterdal et al., 2013). Резуль-

таты математического моделирования (Шанин и др., 2022) показали, что создание монокультур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) оказалось менее эффективным по сравнению с естественным за­растанием мелколиственным древостоем, что противоречит принципу дополнительности. Наибольшая эффективность в накоплении углерода спрогнозирована для смешанных культур сосны обыкновенной с примесью 2-3 единиц мелколиственных видов — березы и осины (*Betula* spp. и *Populus tremula*).

Создание смешанных насаждений вместо монокультур может способствовать более высоким запасам почвенного углерода вследствие взаимодополняемости надземных и подземных ниш (Pretzsch, 2014). Во-первых, в смешанных насаждениях производство биомассы, следовательно, и поступление опада выше, чем у чистых насаждений (Resh et al., 2002); во-вторых, более эффективное использование корнями объема почвы, поэтому отмечается повышенное поступление корневого опада (Finér et al., 2017).

На участках национальной инвентаризации лесов умеренной и бореальной зоны по всей Швеции была обнаружена устойчивая положительная связь между видовым разнообразием и запасом углерода в почве (Gamfeldt et al., 2013). Такие же закономерности выявлены для субтропических лесов Китая (Li et al., 2019). В работе (Аккумуляция углерода..., 2018) на примере лесов Московской, Брянской областей

и Северо-западного Кавказа показана тесная линейная положительная связь между запасами углерода в минеральных горизонтах почв и видовой насыщенностью, отражающей возрастающее разнообразие состава (разного соотношения между элементами питания и вторичными метаболитами) опада, продуцируемого растениями разных видов. Для этих же объектов позднее показано, что смешанный опад является предиктором высокой активности дождевых червей разных функциональных групп и, как следствие, высокого запаса почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах (Kuznetsova et al., 2021). В работе (Кузнецова и др., 2020) показано, что увеличение доли подростов лиственных пород деревьев и трав, продуцирующих опад высокого качества, способствует повышению скорости разложения опада, снижению запасов подстилки, увеличению запасов углерода в минеральном профиле. В Центральной Европе лучшим вариантом являются смеси бука и ели, даже если чистые еловые насаждения имеют более высокую скорость роста (Pretzsch, 2005). Это может быть связано с вкладом различных видов древесных растений во внутрипрофильное распределение углерода в почвах. В работе Фишера с соавт. (Fischer et al., 2002) показано, что при посадке бука в сосновые насаждения больше углерода накапливается в более глубоких минеральных слоях почвы, так как корни бука проникают глубже в почву, чем корни сосны. В то же время созда-

ние елового леса после букового приводит к высвобождению углерода из минеральных горизонтов почвы, которые больше не пронизаны корнями (Kreutzer et al., 1986). Также показано, что небольшая добавка быстроразлагаемого опада лиственных видов деревьев приводит к переносу углерода в минеральные горизонты почв (Cotrufo et al., 2013; Córdova et al., 2018) за счет увеличения потока растворенного органического вещества из подстилки (Fröberg et al., 2011). Учеными ведется разработка функциональной классификации лесов по оценке эффективности выполнения ими функции регулирования цикла углерода, в основе которой лежат экосистемные процессы разложения опада (Лукина и др., 2021).

Видовой состав влияет на стабильность почвенного углерода. Исследования в Германии показали, что хвойные леса хранят около 35% общего количества почвенного углерода в лабильном органическом слое, который часто подвержен антропогенному воздействию, лесным пожарам и изменению температуры (Wiesmeier et al., 2013). Смешанные леса содержат больше углерода в минеральной толще, поэтому углерод менее подвержен изменениям температуры. Стабильность почвенного углерода в минеральной почве выше в смешанных лесах, чем в хвойных, в том числе из-за симбиотической связи лиственных видов с арбускулярной микоризой (Craig et al., 2018; Keller et al., 2021).

Различия в запасах углерода в почвах чистых и смешанных лесов объясняются также влиянием древесных растений на поступление растворенного органического углерода и на его вынос с почвенными водами. Принято считать, что из-за высокого индекса листовой поверхности хвойные растения лучше, чем лиственные, способствуют перехвату и транспирации осадков (Achat et al., 2015), что влияет на объемы выноса почвенного углерода и его перераспределение в профиле. Однако в работе А. И. Кузнецовой и др. (2022) показано, что в старовозрастных полидоминантных хвойно-широколиственных лесах поступление углерода с осадками меньше, чем в молодых сосняках кустарничково-зеленомошных и сосняках сложных. Это связано с более плотным пологом древостоя, который эффективнее перехватывает осадки, и с меньшим обогащением воды углеродом во время прохождения осадков через полог. Поэтому вынос углерода из органогенных горизонтов в более старых полидоминантных широколиственных лесах в среднем в 4.8 раза ниже, чем в относительно молодых сосняках.

Тем не менее, результаты исследований в США показывают, что лесовосстановление, площади которого в настоящее время занимают более 500 млн га, в долгосрочной перспективе увеличивает запасы углерода в верхнем слое почвы и что земли с восстановленными лесами будут поглощать кумулятивно $1.3-2.1 \cdot 10^9$ т углеро-

да в течение столетия ($13-21 \times 10^6$ т $C \cdot g^{-1}$). Ежегодно эти приросты углерода составляют 10% поглощения углерода в лесном секторе США (Nave et al., 2018). С 1950 г. по 2012 г. плантации в Китае, площадь которых равна 79.5 млн га, секвестрировали 1.686×10^9 т углерода. Запас углерода на современных плантациях Китая составляет 7.894×10^9 т, включая 21.4% от общего поглощения в виде лесной биомассы и 78.6% в виде органического вещества почвы (Huang et al., 2012).

По мнению ряда экспертов, в том числе экспертов Научного совета Российской академии наук по лесу (Резолюция ..., 2021), одним из перспективных видов лесных климатических проектов для России является лесоразведение, в том числе плантационное, на заброшенных сельскохозяйственных землях. По оценкам Р. М. Риттер и Л. Риттер (2020), на плантациях пяти видов деревьев (гибриды осины, тополя, березы повислой, ели европейской, лиственницы) на бывших сельскохозяйственных землях Швеции скорость секвестрации углерода спустя почти десятилетие колебалась от нуля до $2.3-4.9$ т C $га^{-1}$ $год^{-1}$, средние скорости секвестрации почвенного углерода составляли от -3.0 до 0.78 т C $га^{-1}$ $год^{-1}$ в течение первых 8–9 лет. По данным полевого эксперимента (Rytter, 2012) в южной и центральной Швеции, накопление углерода в древесной биомассе лесными плантациями тополя и ивы на пахотных землях оценивается в $76.6-80.1$ т C $га^{-1}$ и накопле-

ние углерода в почве — в $9.0-10.3$ т C $га^{-1}$ за первые 20–22 года выращивания. Средние скорости секвестрации углерода составляли $3.5-4.0$ т C $га^{-1}$ $год^{-1}$ в древесной биомассе и $0.4-0.5$ т C $га^{-1}$ $год^{-1}$ в почве. По другим данным, в условиях штата Айова, США, при выращивании ивы и тополя для биотоплива скорость накопления углерода в биомассе составляет 3.4 и 4.3 т C $га^{-1}$ $год^{-1}$, в почве — 0.9 и 1.9 соответственно (Lemus, Lal, 2005). Также сообщалось, что запасы углерода в почве под 24-летними плантациями ивы и тополя в 1.5 раза больше, чем на безлесной территории (Georgiadis et al., 2017). Результаты модельных оценок (Припутина и др., 2016) для плантаций быстрорастущих форм осины в условиях Республики Марий Эл показали, что за 30 лет почвенные запасы углерода изменяются от -06.6 до 19.5 т $га^{-1}$ в зависимости от схемы посадки. Следует отметить, что большинство опубликованных натуральных оценок годового чистого изменения запасов углерода почвы на лесных энергетических плантациях превышает минимальные требования (0.25 т C $га^{-1}$ $год^{-1}$, Volk et al., 2004) для признания таких плантаций из быстрорастущих видов древесных растений углероднейтральным.

2.3. Рубки ухода

Механизм влияния рубок ухода на почвенный углерод такой же, как у выборочных рубок. Ожидается, что частичное удаление древесного полога сократит за-

пасы углерода в почве из-за уменьшения поступления опада и/или увеличения скорости его разложения из-за увеличения температуры и влажности почвы, особенно в первые годы после рубок ухода, когда полог открыт. Показано, что рубки ухода приводят к повышению температуры почвы на 8.7% и дыхания почвы на 29.4%, за счет чего сокращается запас подстилки на 23.7% (Zhang et al., 2018). Рубки ухода могут привести к значительному сокращению количества крупных древесных остатков (Achat et al., 2015), поскольку увеличивается продолжительность жизни листьев и ветвей из-за увеличения расстояния между деревьями. Тем не менее, рубки ухода снижают конкуренцию между деревьями, увеличивая прирост запаса углерода в биомассе древостоя. Экспериментальные данные (Lee et al., 2023) показали, что чистое поглощение углерода (разница между ежегодным увеличением пула углерода в древесине и выбросами углерода в результате микробного дыхания) в насаждениях туполистного кипарисовика (*Chamaecyparis obtusa* (Siebold and Zucc.) Endl.) увеличилось при удалении 30% древостоя по сравнению с нетронутым уходом контролем.

Однако в большинстве исследований не сообщалось о значительном воздействии рубок ухода на запасы почвенного углерода минеральных горизонтов (Noormets et al., 2015; Zhou et al., 2013; Kim et al., 2016), хотя некоторые исследователи сообщали о потере углерода (например,

Mushinski et al., 2019) даже в более глубоких горизонтах почвы (до 1 м) (Gross et al., 2018). Очевидно, что степень изменения запасов углерода зависит от интенсивности рубки. Запасы органического углерода в лесной подстилке могут быть уменьшены в случае рубки высокой интенсивности, например, до 50% уменьшения площади поперечных сечений по сравнению с контролем (Vesterdal et al., 1995; Achat et al., 2015; Bravo-Oviedo et al., 2015). Метаанализ (Zhang et al., 2018) показал, что удаление менее 33% запаса стволовой древесины способствует увеличению запаса углерода в почве на 17.2%; удаление 33–65% запаса стволовой древесины не оказывает влияние на запасы почвенного углерода; удаление более 65% запаса стволовой древесины снижает запас углерода в почве на 7.6%. При этом общее содержание углерода в почве увеличивается на 29.5% в течение первых двух лет после рубки ухода независимо от ее интенсивности. Авторы (Zhang et al., 2018) связывают этот факт с поступлением большого количества органического вещества после рубок ухода. Кроме того, повышенная температура почвы и солнечная радиация способствуют росту подлеска и оставшихся деревьев. К тому же Панг с соавторами (Pang et al., 2016) обнаружили положительное влияние температуры и влажности почвы на рост мелких корней после рубок ухода.

Необходимы долгосрочные полевые эксперименты по изучению запасов почвенного углерода при разной интенсив-

ности рубок ухода (Zhang et al., 2018). Такие эксперименты были бы необходимы, чтобы связать запасы почвенного углерода с интенсивностью прореживания и определить пороговые значения количества стволов, подлежащих удалению. К тому же необходимо учитывать абиотические (климатические условия, почвообразующие породы, рельеф) и биотические (растительность, почвенная биота) факторы функционирования существующих и новых лесных экосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из эффективных путей достижения целей Парижского соглашения являются лесные климатические проекты, неотъемлемая часть которых — повышение продуктивности существующих лесных экосистем, в том числе за счет лесоводственных мероприятий. Однако при оценке их эффективности часто игнорируются происходящие в пуле почвенного углерода изменения, которые могут повлиять на выполнение требований к лесоклиматическим проектам: дополнительность, постоянство и отсутствие утечки.

Анализ современного состояния вопроса позволяет заключить, что лесоводственные мероприятия оказывают воздействие на содержание почвенного углерода через изменение скорости поступления и разложения органического вещества и, как следствие, влияют на перераспределение углерода в профиле почв. Рубки

лесных насаждений являются главным фактором изменения пула углерода почв. Чаще всего сообщается о сокращении запасов углерода при сплошных рубках и об увеличении их при выборочных рубках и рубках ухода слабой и умеренной интенсивности. Аргументом в пользу умеренных рубок также служит поддержание структурного разнообразия сообществ, создание мозаичности, разновозрастности насаждений. Леса с высоким биоразнообразием эффективнее накапливают и хранят углерод. Удаление порубочных остатков уменьшает запас углерода в почве через сокращение поступления органических остатков и через влияние на микробные сообщества и почвенный микроклимат. В большинстве обзоров при создании лесных культур представлены первоначальные потери углерода с последующим небольшим увеличением. Потеря углерода может происходить в течение короткого периода после облесения, когда существует дисбаланс между потерей углерода в результате микробного дыхания почвы и поступлением углерода в результате опада. Создание смешанных насаждений вместо монокультур может привести к более высоким запасам почвенного углерода вследствие взаимодополняемости надземных и подземных ниш, более высокого поступления опада в почву из-за уплотнения полога, более высокой продуктивности смешанных насаждений, большего поступления корневого опада из-за максимально эффективного использования

объема почвы корнями, эффективного регулирования поступления углерода с осадками и его выноса с почвенными водами. Одним из перспективных видов лесных климатических проектов для России является плантационное лесоразведение на заброшенных сельскохозяйственных землях из-за низкой базовой линии проекта, значительных площадей и транспортной доступности заброшенных участков. Опубликованные натурные исследования показывают высокий потенциал использования клонов быстрорастущих древесных растений с целью лесоклиматиче-

ских проектов. Тем не менее, необходимы долгосрочные полевые эксперименты для оценки влияния лесоводственных мероприятий на запасы углерода почвы для конкретных почвенно-климатических условий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках молодежной лаборатории ЦЭПЛ РАН «Климаторегулирующие функции и биоразнообразие лесов» (регистрационный номер 122111500023-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / Под ред. Н. В. Лукиной. М.: Тов-во научн. изданий КМК, 2018. 232 с.

Быховец С. С., Комаров А. С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение. 2002. № 4. С. 443–452.

Дымов А. А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 7. С. 787–798.

Дымов А. А., Старцев В. В. Изменение температурного режима подзолистых почв в процессе естественного лесовозобновления после сплошных рубок // Почвоведение. 2016. № 5. С. 599–608.

Законопроект № 1116605-7 «Об ограничении выбросов парниковых газов». URL: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/1116605-7> (дата обращения 08.12.2022).

Карпечко Ю. В. Влияние рубок на сток с лесопокрытой части водосбора Онежского озера // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 5. С. 13–20.

Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 255 с.

Кондратьев С. А., Казмина М. В., Шмакова М. В., Маркова Е. Г. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты // Региональная экология. 2011. № 3–4. С. 50–59.

Кондратьев С. А., Карпечко Ю. В., Шмакова М. В., Расулова А. М., Родионов В. З.

- Опыт экспериментальных исследований и математического моделирования воздействий вырубki леса и последующего лесовосстановления на сток и вынос химических веществ с лесных водосборов // Региональная экология. 2019. № 1 (55). С. 25–53.
- Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Изучение формирования стока с речных водосборов методами математического моделирования (на примере бассейна Ладожского озера) // Сб. науч. тр. XII съезда РГО. СПб.: Наука, 2005. Т. 6. С. 99–104.
- Кузнецова А. И., Лукина Н. В., Горнов А. В., Горнова М. В., Тихонова Е. В., Смирнов В. Э., Данилова М. А., Тебенькова Д. Н., Браславская Т. Ю., Кузнецов В. А., Ткаченко Ю. Н., Геникова Н. В. Запасы углерода в песчаных почвах сосновых лесов на западе России // Почвоведение. 2020. № 8. С. 959–969.
- Кузнецова А. И., Горнов А. В., Горнова М. В., Тебенькова Д. Н., Никитина А. Д., Кузнецов В. А. Оценка выноса углерода с почвенными водами в доминирующих типах леса Брянского Полесья // Почвоведение. 2022. № 9. С. 1086–1097.
- Лукина Н. В., Гераськина А. П., Кузнецова А. И., Смирнов В. Э., Горнов А. В., Шевченко Н. Е., Тихонова Е. В., Тебенькова Д. Н., Басова Е. В. Функциональная классификация лесов: актуальность и подходы к разработке // Лесоведение. 2021. № 6. С. 566–580.
- Парижское соглашение. 2015. URL: <https://golnk.ru/oMxvm> (дата обращения 08.02.2022).
- Припутина И. В., Фролова Г. Г., Шанин В. Н. Выбор оптимальных схем посадки лесных культур: компьютерный эксперимент // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 2. С. 333–343.
- Резолюция по итогам научных дебатов «Лесные климатические проекты в России», 19.10.2021 г., Москва, ЦЭПЛ РАН. URL: <https://goo.su/ITAB>. (дата обращения 08.02.2022).
- Специальные лесоклиматические проекты могут способствовать снижению углеродного налога, который Евросоюз планирует ввести в 2025 году. 2021 URL: <http://www.igras.ru/news/2719> (дата обращения 07.02.2022).
- Трансформация экосистем севера в зоне интенсивной заготовки древесины // Труды Коми научного центра УрО РАН. 1996. № 154. 160 с.
- Федоров Б. Г. Российский углеродный баланс: монография. М.: Научный консультант, 2017. 82 с.
- Ханина Л. Г., Бобровский М. В., Комаров А. С., Михайлов А. В., Быховец С. С., Лукьянов А. М. Моделирование динамики разнообразия лесного напочвенного покрова // Лесоведение. 2006. № 1. С. 70–80.
- Честных О. В., Грабовский В. И., Замолодчиков Д. Г. Оценка запасов почвенного углерода лесных районов России с ис-

- пользованием баз данных почвенных характеристик // Лесоведение. 2022. № 3. С. 227–238.
- Чумаченко С. И. Базовая модель динамики многовидового разновозрастного лесного ценоза // Вопросы экологии и моделирования лесных экосистем: сб. науч. тр. МЛТИ. Вып. 248. М.: МЛТИ, 1993. С. 147–180.
- Чумаченко С. И., Шанин В. Н., Митрофанов Е. М., Лебедев С. В., Фролов П. В., Кондратьев С. А., Шмакова М. В., Лукина Н. В., Тебенькова Д. Н., Ханина Л. Г., Грабарник П. Я., Чертов О. Г., Бобровский М. В. RUFLOSS — программный модуль интеграции имитационных моделей для оценки взаимодействий между лесными экосистемными услугами. Свидетельство № 2020666245 от 12.10.2020.
- Шанин В. Н., Фролов П. В., Коротков В. Н. Всегда ли искусственное лесовосстановление может быть лесоклиматическим проектом // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 2. С. 103–139.
- Achat D. L., Fortin M., Landmann G., Ringeval B., Augusto L. Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. No. 1. P. 1–10.
- Atmadja S., Verchot L. A review of the state of research, policies and strategies in addressing leakage from reducing emissions from deforestation and forest degradation (REDD+) // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2012. No. 17 (3). P. 311–336.
- Auckland L., Costa P. M., Brown S. A. Conceptual framework and its application for addressing leakage: the case of avoided deforestation // Climate Policy. 2003. No. 3 (2). P. 123–136.
- Behrendt H., Dannowski R. Nutrients and heavy metals in the Odra River System. Germany: Weissensee Verlag Publ., 2007. 337 p.
- Boča A., Van Miegroet H., Gruselle M. C. Forest overstorey effect on soil organic carbon storage: a meta-analysis // Soil Science Society of America Journal. 2014. Vol. 78. No. S1. P. 35–47.
- Bravo-Oviedo A., Ruiz-Peinado R., Modrego P., Alonso R., Montero G. Forest thinning impact on carbon stock and soil condition in Southern European populations of *P. sylvestris* L. // Forest Ecology and Management. 2015. Vol. 357. P. 259–267.
- Cardenas E., Kranabetter J. M., Hope G., Maas K. R., Hallam S., Mohn W. W. Forest harvesting reduces the soil metagenomic potential for biomass decomposition // The ISME Journal. 2015. Vol. 9. No. 11. P. 2465–2476.
- Carlyle J. C. Organic carbon in forested sandy soils: properties, processes, and the impact of forest management // New Zealand Journal of Forestry Science. 1993. Vol. 23. No. 3. P. 390–402.
- Chertov O., Komarov A., Shaw C., Bykhovets S., Frolov P., Shanin V., Grabarnik P., Pripulina I., Zubkova E., Shashkov M. Romul_

- Hum—A model of soil organic matter formation coupling with soil biota activity. II. Parameterisation of the soil food web biota activity // *Ecological Modelling*. 2017a. Vol. 345. P. 125–139.
- Chertov O., Shaw C., Shashkov M., Komarov A., Bykhovets S., Shanin V., Grabarnik P., Frollov P., Priputina I., Kalinina O., Zubkova E.* Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. III. Parameterisation of earthworm activity // *Ecological Modelling*. 2017b. Vol. 345. P. 140–149.
- Christophel D., Höllerl S., Prietzel J., Steffens M.* Long-term development of soil organic carbon and nitrogen stocks after shelterwood-and clear-cutting in a mountain forest in the Bavarian Limestone Alps // *European Journal of Forest Research*. 2015. Vol. 134. No. 4. P. 623–640.
- Chumachenko S. I., Korotkov V. N., Palenova M. M., Politov D.* Simulation modeling of long-term stand dynamics at different scenarios of forest management for coniferous-broad-leaved forests // *Ecological Modelling*. 2003. Vol. 170. P. 345–362.
- Clarke N., Gundersen, P., Jönsson-Belyazid U., Kjønnaas O. J., Persson, T., Sigurdsson, B. D., Vesterdal L.* Influence of different tree-harvesting intensities on forest soil carbon stocks in boreal and northern temperate forest ecosystems // *Forest Ecology and Management*. 2015. Vol. 351. P. 9–19.
- Córdova S. C., Olk D. C., Dietzel R. N., Mueller K. E., Archontoulis S. V., Castella M. J.* Plant litter quality affects the accumulation rate, composition, and stability of mineral-associated soil organic matter // *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. Vol. 125. P. 115–124.
- Cotrufo M. F., Wallenstein M. D., Boot C. M., Deneff K., Paul E.* The Microbial Efficiency Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? // *Global change biology*. 2013. Vol. 19. No. 4. P. 988–995.
- Craig M. E., Turner B. L., Liang C., Clay K., Johnson D. J., Phillips R. P.* Tree mycorrhizal type predicts within site variability in the storage and distribution of soil organic matter // *Global Change Biology*. 2018. Vol. 24. No. 8. P. 3317–3330.
- De Coninck H., Revi A., Babiker M., Bertoldi P., Buckeridge M., Cartwright A., Sugiyama T.* Strengthening and implementing the global response // *Global warming of 1.5 C: Summary for policy makers*. IPCC-The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2018. P. 313–443.
- Devine W. D., Harrington C. A.* Influence of harvest residues and vegetation on microsite soil and air temperatures in a young conifer plantation // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2007. Vol. 145. No. 1–2. P. 125–138.
- Donofrio S., Maguire P., Daley Ch., Calderon C., Lin K.* Forest Trends' Ecosystem Marketplace The Art of Integrity: State of Voluntary Carbon Markets, Q3 Insights Brief-

- ing. Washington DC., Forest Trends Association, 2022. 21 p.
- FIA. Forest Inventory Analysis National Program, USFS. USDA Forest Service. 2020. Retrieved July 10, 2020, available at: <https://www.fia.fs.fed.us/> (дата обращения 24.06.2022).
- Finér L., Domisch T., Dawud S. M., Raulund-Rasmussen K., Vesterdal L., Bouriaud O., Valladares F.* Conifer proportion explains fine root biomass more than tree species diversity and site factors in major European forest types // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 406. P. 330–350.
- Fischer H., Bens O., Hüttl R.* Veränderung von Humusform, -vorrat und -verteilung im Zuge von Waldumbau-Maßnahmen im Nordostdeutschen Tiefland // *Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter forstliches Jahrbuch*. 2002. Vol. 121. No. 6. P. 322–334.
- Fröberg M., Hansson K., Kleja D. B., Alavi Gh.* Dissolved organic carbon and nitrogen leaching from Scots pine, Norway spruce and silver birch stands in southern Sweden // *Forest Ecology and Management*. 2011. Vol. 262. No. 9. P. 1742–1747.
- Gamfeldt L., Snäll T., Bagchi R., Jonsson M., Gustafsson L., Kjellander P., Bengtsson J.* Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species // *Nature Communications*. 2013. Vol. 4. No. 1. P. 1–8.
- Georgiadis P., Vesterdal L., Stupak I., Raulund-Rasmussen K.* Accumulation of soil organic carbon after cropland conversion to short rotation willow and poplar // *GCB Bioenergy*. 2017. Vol. 9. No. 8. P. 1390–1401.
- Gillingham K., Stock J. H.* The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions // *Journal of Economic Perspectives*. 2018. No. 32 (4). P. 53–72.
- Gross C. D., James J. N., Turnblom E. C., Harrison R. B.* Thinning treatments reduce deep soil carbon and nitrogen stocks in a coastal pacific northwest forest // *Forests*. 2018. Vol. 9. No. 5. Article 238.
- Guo L. B., Gifford R. M.* Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis // *Global Change Biology*. 2002. Vol. 8. No. 4. P. 345–360.
- Hoffmann T., Schlummer M., Notebaert B., Verstraeten G., Korup O.* Carbon burial in soil sediments from Holocene agricultural erosion, Central Europe // *Global Biogeochemical Cycles*. 2013. Vol. 27. No. 3. P. 828–835.
- Holden S. R., Treseder K. K.* A meta-analysis of soil microbial biomass responses to forest disturbances // *Frontiers in Microbiology*. 2013. Vol. 4. Article 163.
- Hoover C. M.* Management impacts on forest floor and soil organic carbon in northern temperate forests of the US // *Carbon Balance and Management*. 2011. Vol. 6. No. 1. P. 1–8.

- Huang L., Liu J., Shao Q., Xu X. Carbon sequestration by forestation across China: Past, present, and future // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16. No. 2. P. 1291–1299.
- Hyvönen R., Kaarakka L., Leppälampi-Kujanen J., Olsson B. A., Palviainen M., Vegerfors-Persson B., Helmisaari H. S. Effects of stump harvesting on soil C and N stocks and vegetation 8–13 years after clear-cutting // *Forest Ecology and Management*. 2016. Vol. 371. P. 23–32.
- James J., Harrison R. The effect of harvest on forest soil carbon: A meta-analysis // *Forests*. 2016. Vol. 7. No. 12. Article. 308.
- Johnson D. W., Curtis P. S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta-analysis // *Forest Ecology and Management*. 2001. Vol. 140. No. 2–3. P. 227–238.
- Johnson K., Scatena F. N., Pan Y. Short- and long-term responses of total soil organic carbon to harvesting in a northern hardwood forest // *Forest Ecology and Management*. 2010. Vol. 259. P. 1262–1267.
- Jurevics A., Peichl M., Olsson B. A., Strömgren M., Egnell G. Slash and stump harvest have no general impact on soil and tree biomass C pools after 32–39 years // *Forest Ecology and Management*. 2016. Vol. 371. P. 33–41.
- Kalinina L., Chertov O., Frolov P., Goryachkin S., Kuner P., Küper J., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Lyuri D., Rusakov A., Kuzyakov Y., Giani L. Alteration process during the post-agricultural restoration of Luvisols of the temperate broad-leaved forest in Russia // *Catena*. 2018. Vol. 171. P. 602–612.
- Katzensteiner K. Effects of harvesting on nutrient leaching in a Norway spruce (*Picea abies* Karst.) ecosystem on a Lithic Leptosol in the Northern Limestone Alps // *Plant and Soil*. 2003. Vol. 250. No. 1. P. 59–73.
- Keller A. B., Brzostek E. R., Craig M. E., Fisher J. B., Phillips R. P. Root-derived inputs are major contributors to soil carbon in temperate forests, but vary by mycorrhizal type // *Ecology Letters*. 2021. Vol. 24. No. 4. P. 626–635.
- Khanina L., Bobrovsky M., Komarov A., Mikhajlov A. Modeling dynamics of forest ground vegetation diversity under different forest management regimes // *Forest Ecology and Management*. 2007. Vol. 248. P. 80–94.
- Khanina L. G., Bobrovsky M. V., Komarov A. S., Shanin V. N., Bykhovets S. S. Model predictions of effects of different climate change scenarios on species diversity with or without management intervention, repeated thinning, for a site in Central European Russia // *Nitrogen Deposition, Critical Loads and Biodiversity*. Springer, 2014. P. 173–182.
- Kim S., Han S. H., Li G., Yoon T. K., Lee S. T., Kim C., Son Y. Effects of thinning intensity on nutrient concentration and enzyme activity

- in *Larix kaempferi* forest soils // Journal of Ecology and Environment. 2016. Vol. 40. No. 1. P. 1–7.
- Klein D., Fuentes J. P., Schmidt A., Schmidt H., Schulte A. Soil organic C as affected by silvicultural and exploitative interventions in *Nothofagus pumilio* forests of the Chilean Patagonia // Forest Ecology and Management. 2008. Vol. 255. No. 10. P. 3549–3555.
- Kohout P., Charvátová M., Štursová M., Mašíňová T., Tomšovský M., Baldrian P. Clearcutting alters decomposition processes and initiates complex restructuring of fungal communities in soil and tree roots // The ISME Journal. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 692–703.
- Komarov A., Chertov O., Bykhovets S., Shaw C., Nadporozhskaya M., Frolov P., Shashkov M., Shanin V., Grabarnik P., Pripulina I., Zubkova E. Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing // Ecological Modelling. 2017. Vol. 345. P. 113–124.
- Kreutzer K., Deschu E., Hösl G. Vergleichende Untersuchungen über den Einfluß von Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) auf die Sickerwasserqualität // Forstwissenschaftliches Centralblatt. 1986. Vol. 105. P. 364–371.
- Kulmala L., Aaltonen H., Berninger F., Kieloaho A. J., Levula J., Bäck J., Pumpanen J. Changes in biogeochemistry and carbon fluxes in a boreal forest after the clearcutting and partial burning of slash // Agricultural and Forest Meteorology. 2014. Vol. 188. P. 33–44.
- Kuznetsova A. I., Geraskina A. P., Lukina N. V., Smirnov V. E., Tikhonova E. V., Shevchenko N. E., Gornov A. V., Ruchinskaya E. V., Tebenkova D. N. Linking vegetation, soil carbon stocks, and earthworms in upland coniferous–broadleaf forests // Forests. 2021. No. 12 (9). Article 1179.
- Laganiere J., Angers D. A., Pare D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis // Global Change Biology. 2010. Vol. 16. No. 1. P. 439–453.
- Lee J. G., Lee D. H., Jeong J. Y., Lee S. G., Han S. H., Kim S. J., Kim H. J. The Effects of Stand Density Control on Carbon Cycle in *Chamaecyparis obtusa* (Siebold and Zucc.) Endl. // Forests. 2023. Vol. 14 (2). Article. 217.
- Lemus R., Lal R. Bioenergy crops and carbon sequestration // Critical Reviews in Plant Sciences. 2005. Vol. 24. No. 1. P. 1–21.
- Li Y., Bruelheide H., Scholten T., Schmid B., Sun Z., Zhang N., Bu W., Liu X., Ma K. Early positive effects of tree species richness on soil organic carbon accumulation in a large-scale forest biodiversity experiment // Journal of Plant Ecology. 2019. Vol. 12. No. 5. P. 882–893.
- Lippke B., Puettmann M., Oneil E., Oliver C. D. The plant a trillion trees campaign to reduce global warming — Fleshing out the concept // Journal of Sustainable Forestry. 2021. Vol. 40. No. 1. P. 1–31.
- Lippke B., Puettmann M. E., Oneil E. CORRIM Tech Note 1. Effective uses of forest de-

- rived products to reduce carbon emissions. The Consortium for Research on Renewable Industrial Materials. 2020. Retrieved July 10, 2020; available at: <https://corrim.org/use-of-forest-products-to-reduce-carbon-emissions/> (дата обращения 24.06.2022).
- Mallik A. U., Hu D.* Soil respiration following site preparation treatments in boreal mixed-wood forest // *Forest Ecology and Management*. 1997. Vol. 97. No. 3. P. 265–275.
- Mayer M., Sandén H., Rewald B., Godbold D. L., Katzensteiner K.* Increase in heterotrophic soil respiration by temperature drives decline in soil organic carbon stocks after forest windthrow in a mountainous ecosystem // *Functional Ecology*. 2017. Vol. 31. No. 5. P. 1163–1172.
- Michaelowa A. Hermwille L., Obergassel W., Butzengeiger S.* Additionality revisited: guarding the integrity of market mechanisms under the Paris Agreement // *Climate Policy*. 2019. Vol. 19. No. 10. P. 1211–1224.
- Morris D. M., Hazlett P. W., Fleming R. L., Kwiaton M. M., Hawdon L. A., Leblanc J. D., Weldon T. P.* Effects of Biomass Removal Levels on Soil Carbon and Nutrient Reserves in Conifer Dominated, Coarse Textured Sites in Northern Ontario: 20 Year Results // *Soil Science Society of America Journal*. 2019. Vol. 83. P. 116–132.
- Mushinski R. M., Gentry T. J., Boutton T. W.* Forest organic matter removal leads to long-term reductions in bacterial and fungal abundance // *Applied Soil Ecology*. 2019. Vol. 137. P. 106–110.
- Nave L. E., Domke G. M., Hofmeister K. L., Mishra U., Perry C. H., Walters B. F., Swanston C. W.* Reforestation can sequester two petagrams of carbon in US topsoils in a century // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018. Vol. 115. No. 11. P. 2776–2781.
- Nave L. E., Vance E. D., Swanston C. W., Curtis P. S.* Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests // *Forest Ecology and Management*. 2010. Vol. 259. No. 5. P. 857–866.
- Noormets A., Epron D., Domec J. C., McNulty S. G., Fox T., Sun G., King J. S.* Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: A review and hypothesis // *Forest Ecology and Management*. 2015. Vol. 355. P. 124–140.
- Oliver C. D., Nassar N. T., Lippke B. R., McCarter J. B.* Carbon, fossil fuel, and biodiversity mitigation with wood and forests // *Journal of Sustainable Forestry*. 2014. Vol. 33. No. 3. P. 248–275.
- Oneil E. E., Lippke B. R.* Integrating products, emission offsets, and wildfire into carbon assessments of Inland Northwest forests // *Wood and Fiber Science*. 2010. Vol. 42. P. 144–164.
- Pan Y., Birdsey R. A., Fang J., Houghton R., Kauppi P. E., Kurz W. A., Hayes D.* A large and persistent carbon sink in the world's forests // *Science*. 2011. Vol. 333. No. 6045. P. 988–993.

- Pang X., Hu B., Bao W., de Oliveira Vargas T., Tian G.* Effect of thinning-induced gap size on soil CO₂ efflux in a reforested spruce forest in the eastern Tibetan Plateau // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2016. Vol. 220. P. 1–9.
- Paul K. I., Polglase P. J., Nyakuengama J. G., Khanna P. K.* Change in soil carbon following afforestation // *Forest Ecology and Management*. 2002. Vol. 168. No. 1–3. P. 241–257.
- Persson T., Lenoir L., Vegerfors B.* Long-term effects of stump harvesting and site preparation on pools and fluxes of soil carbon and nitrogen in central Sweden // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2017. Vol. 32. No. 3. P. 222–229.
- Pötzelsberger E., Hasenauer H.* Soil change after 50 years of converting Norway spruce dominated age class forests into single tree selection forests // *Forest Ecology and Management*. 2015. Vol. 338. P. 176–182.
- Prescott C. E., Blevins L. L., Staley C. L.* Effects of clear-cutting on decomposition rates of litter and forest floor in forests of British Columbia // *Canadian Journal of Forest Research*. 2000. Vol. 30. No. 11. P. 1751–1757.
- Pretzsch H.* Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures // *Forest Ecology and Management*. 2014. Vol. 327. P. 251–264.
- Pretzsch H.* Diversity and productivity in forests: evidence from long-term experimental plots // *Forest Diversity and Function*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005. P. 41–64.
- Puhlick J. J., Fernandez I. J., Weiskittel A. R.* Evaluation of forest management effects on the mineral soil carbon pool of a lowland, mixed-species forest in Maine, USA // *Canadian Journal of Soil Science*. 2016. Vol. 96. No. 2. P. 207–218.
- Pumpanen J., Westman C. J., Ilvesniemi H.* Soil CO₂ efflux from a podzolic forest soil before and after forest clear-cutting and site preparation // *Boreal Environment Research*. 2004. Vol. 9. P. 199–212.
- Resh S. C., Binkley D., Parrotta J. A.* Greater soil carbon sequestration under nitrogen-fixing trees compared with Eucalyptus species // *Ecosystems*. 2002. Vol. 5. No. 3. P. 217–231.
- Richter D. D., Markewitz D., Trumbore S. E., Wells C. G.* Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest // *Nature*. 1999. Vol. 400. No. 6739. P. 56–58.
- Rytter R. M.* The potential of willow and poplar plantations as carbon sinks in Sweden // *Biomass and Bioenergy*. 2012. Vol. 36. P. 86–95.
- Rytter R. M., Rytter L.* Changes in soil chemistry in an afforestation experiment with five tree species // *Plant and Soil*. 2020. No. 456. P. 425–437.
- Schmidt M. G., Macdonald S. E., Rothwell R. L.* Impacts of harvesting and mechanical site preparation on soil chemical proper-

- ties of mixed-wood boreal forest sites in Alberta // *Canadian Journal of Soil Science*. 1996. Vol. 76. No. 4. P. 531–540.
- Shanin V., Juutinen A., Ahtikoski A., Frolov P., Chertov O., Rämö J., Lehtonen A., Laiho R., Mäkiranta P., Nieminen M., Laurén A., Sarkkola S., Penttilä T., Ľupek B., Mäkipää R.* Simulation modelling of greenhouse gas balance in continuous-cover forestry of Norway spruce stands on nutrient-rich drained peatlands // *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 496. Article 119479.
- Streck C.* REDD+ and leakage: debunking myths and promoting integrated solutions // *Climate Policy*. 2021. Vol. 21 (6). P. 843–852.
- Strömgren M., Egnell G., Olsson B. A.* Carbon stocks in four forest stands in Sweden 25 years after harvesting of slash and stumps // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 290. P. 59–66.
- Strukelj M., Brais S., Paré D.* Nine-year changes in carbon dynamics following different intensities of harvesting in boreal aspen stands // *European Journal of Forest Research*. 2015. No. 5. P. 737–754.
- Tang J., Bolstad P. V., Martin J. G.* Soil carbon fluxes and stocks in a Great Lakes forest chronosequence // *Global Change Biology*. 2009. Vol. 15. No. 1. P. 145–155.
- The greenhouse gas protocol. The land use, land-use change, and forestry guidance for GHG project accounting. Washington: Word Resource Institute, 2006. 97 p.; available at: <https://goo.su/putZd> (дата обращения 08.02.2022)
- Thiffault E., Hannam K. D., Paré D., Titus B. D., Hazlett P. W., Maynard D. G., Brais S.* Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests—A review // *Environmental Reviews*. 2011. Vol. 19. P. 278–309.
- Vanguelova E. I., Pitman R., Benham S., Perks M., Morison J. I.* Impact of tree stump harvesting on soil carbon and nutrients and second rotation tree growth in Mid-Wales, UK // *Open Journal of Forestry*. 2017. Vol. 7. No. 1. Article ID 73642.
- Verified Carbon Standard, v 4.2. Issued: 19 September 2019. Updated: 20 available at January 2022. available at: <https://verra.org/project/vcs-program/rules-and-requirements/> (дата обращения 24.06.2022).
- Vesterdal L., Clarke N., Sigurdsson B. D., Gundersen P.* Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 309. P. 4–18.
- Vesterdal L., Dalsgaard M., Felby C., Raulund-Rasmussen K., Jørgensen B. B.* Effects of thinning and soil properties on accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus in the forest floor of Norway spruce stands // *Forest Ecology and Management*. 1995. Vol. 77. No. 1–3. P. 1–10.
- Vesterdal L., Raulund-Rasmussen K.* Forest floor chemistry under seven tree species along a soil fertility gradient // *Canadian*

- Journal of Forest Research. 1998. Vol. 28. No. 11. P. 1636–1647.
- Vesterdal L., Ritter E., Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land // *Forest Ecology and Management*. 2002. Vol. 169. No. 1–2. P. 137–147.
- Volk T. A., Verwijst T., Tharakan P. J., Abrahamson L. P., White E. H. Growing fuel: a sustainability assessment of willow biomass crops // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2004. Vol. 2 (8), P. 411–418.
- Walmsley J. D., Jones D. L., Reynolds B., Price M. H., Healey J. R. Whole tree harvesting can reduce second rotation forest productivity // *Forest Ecology and Management*. 2009. Vol. 257. No. 3. P. 1104–1111.
- Warren K. L., Ashton M. S. Change in soil and forest floor carbon after shelterwood harvests in a New England Oak-Hardwood Forest, USA // *International Journal of Forestry Research*. 2014. Vol. 2014. Article ID 527236.
- Wiesmeier M., Prietzel J., Barthold F., Spörlein P., Geuß U., Hangen E., Kögel-Knabner I. Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria)–Implications for carbon sequestration // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 295. P. 162–172.
- Zabowski D., Chambreau D., Rotramel N., Thies W. G. Long-term effects of stump removal to control root rot on forest soil bulk density, soil carbon and nitrogen content // *Forest Ecology and Management*. 2008. Vol. 255. No. 3–4. P. 720–727.
- Zhang X., Guan D., Li W., Sun D., Jin C., Yuan F., Wu J. The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: A meta-analysis // *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 429. P. 36–43.
- Zhou D., Zhao S. Q., Liu S., Oeding J. A meta-analysis on the impacts of partial cutting on forest structure and carbon storage // *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10. P. 3691–3703.

REFERENCES

- Achat D. L., Fortin M., Landmann G., Ringeval B., Augusto L., Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting, *Scientific reports*, 2015, Vol. 5, No 1, pp. 1–10.
- Akkumuljacija ugljeroda v lesnyh pochvah i sukcesionnyj status lesov (Carbon accumulation in forest soils and the successional status of forests) / Pod red. Lukinoj N. V. Moscow: KMK, 2018, 232 p.
- Atmadja S., Verchot L., A review of the state of research, policies and strategies in addressing leakage from reducing emissions from deforestation and forest degradation (REDD+), *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2012, No 17(3), pp. 311–336.
- Aukland L., Costa P. M., Brown S. A., Conceptual framework and its application for addressing leakage: the case of avoided deforestation, *Climate Policy*, 2003, No 3(2), pp. 123–136.
- Behrendt H., Dannowski R., *Nutrients and heavy metals in the Odra River System*,

- Germany: Weissensee Verlag Publ, 2007, 337 p.
- Boča A., Van Miegroet H., Gruselle M. C., Forest overstory effect on soil organic carbon storage: a meta-analysis, *Soil Science Society of America Journal*, 2014, Vol. 78, No S1, pp. 35–47.
- Bravo-Oviedo A., Ruiz-Peinado R., Modrego P., Alonso R., Montero G., Forest thinning impact on carbon stock and soil condition in Southern European populations of *P. sylvestris* L, *Forest Ecology and Management*, 2015, Vol. 357, pp. 259–267.
- Byhovec S. S., Komarov A. S., Prostož statističeskij imitator klimata pochvy s mesjachnym shagom (Simple statistical Soil Climate Simulator with monthly increments), *Pochvovedenie*, 2002, No 4, pp. 443–452.
- Cardenas E., Kranabetter J. M., Hope G., Maas K. R., Hallam S., Mohn W. W., Forest harvesting reduces the soil metagenomic potential for biomass decomposition, *The ISME Journal*, 2015, Vol. 9, No 11, pp. 2465–2476.
- Carlyle J. C., Organic carbon in forested sandy soils: properties, processes, and the impact of forest management, *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1993, Vol. 23, No 3, pp. 390–402.
- Chertov O., Komarov A., Shaw C., Bykhovets S., Frolov P., Shanin V., Grabarnik P., Pripulina I., Zubkova E., Shashkov M., Romul_Hum—A model of soil organic matter formation coupling with soil biota activity. II. Parameterisation of the soil food web biota activity, *Ecological Modelling*, 2017, Vol. 345, pp. 125–139.
- Chertov O., Shaw C., Shashkov M., Komarov A., Bykhovets S., Shanin V., Grabarnik P., Frolov P., Pripulina I., Kalinina O., Zubkova E., Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. III. Parameterisation of earthworm activity, *Ecological Modelling*, 2017, Vol. 345, pp. 140–149.
- Chestnyh O. V., Grabovskij V. I., Zamolodchikov D. G., Ocenka zapasov pochvennogo ugleroda lesnyh rajonov Rossii s ispol'zovaniem baz dannyh pochvennyh harakteristik (Assessment of soil carbon reserves in Russian forest areas using soil characteristics databases), *Lesovedenie*, 2022, No 3, pp. 227–238.
- Christophel D., Höllerl S., Prietzel J., Steffens M., Long-term development of soil organic carbon and nitrogen stocks after shelterwood- and clear-cutting in a mountain forest in the Bavarian Limestone Alps, *European Journal of Forest Research*, 2015, Vol. 134, No 4, pp. 623–640.
- Chumachenko S. I., Shanin V. N., Mitrofanov E. M., Lebedev S. V., Frolov P. V., Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V., Lukina N. V., Teben'kova D. N., Hanina L. G., Grabarnik P. Ja., Chertov O. G. Bobrovskij M. V., RUFLOSS — *programmnyj modul' integracii imitacionnyh modelej dlja ocenki vzaimodejstvij mezhdu lesnymi jekosistemnymi uslugami* (RUFLOSS is a software module for integrating

- simulation models to assess interactions between forest ecosystem services) Svidetel'stvo No 2020666245.
- Chumachenko S. I., Korotkov V. N., Palenova M. M., Politov D., Simulation modeling of long-term stand dynamics at different scenarios of forest management for coniferous–broad-leaved forests, *Ecological Modelling*, 2003, Vol. 170, pp. 345–362.
- Chumachenko S. I., Bazovaja model' dinamiki mnogovidovogo raznovozrastnogo lesnogo cenoza (The basic model of the dynamics of a multi-species multi-age forest cenosis), *Voprosy jekologii i modelirovanija lesnyh jekosistem* (Issues of ecology and modeling of forest ecosystems), *Proc. Conf.*, Vol. 248, Moscow, 1993, pp. 147–180.
- Clarke N., Gundersen P., Jönsson-Belyazid U., Kjønnaas O. J., Persson T., Sigurdsson B. D., Vesterdal L., Influence of different tree-harvesting intensities on forest soil carbon stocks in boreal and northern temperate forest ecosystems, *Forest Ecology and Management*, 2015, Vol. 351, pp. 9–19.
- Córdova S. C., Olk D. C., Dietzel R. N., Mueller K. E., Archontoulis S. V., Castella M. J., Plant litter quality affects the accumulation rate, composition, and stability of mineral-associated soil organic matter, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, Vol. 125, pp. 115–124.
- Cotrufo M. F., Wallenstein M. D., Boot C. M., Deneff K., Paul E., The Microbial Efficiency Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global change biology*, 2013, Vol. 19, No 4, pp. 988–995.
- Craig M. E., Turner B. L., Liang C., Clay K., Johnson D. J., Phillips R. P., Tree mycorrhizal type predicts within site variability in the storage and distribution of soil organic matter, *Global change biology*, 2018, Vol. 24, No 8, pp. 3317–3330.
- De Coninck H., Revi A., Babiker M., Bertoldi P., Buckeridge M., Cartwright A., Sugiyama T., Strengthening and implementing the global response, *Global warming of 1.5 C: Summary for policy makers. — IPCC–The Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2018, pp. 313–443.
- Devine W. D., Harrington C. A., Influence of harvest residues and vegetation on microsite soil and air temperatures in a young conifer plantation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, Vol. 145, No 1–2, pp. 125–138.
- Donofrio S., Maguire P., Daley Ch., Calderon C., Lin K., Forest Trends' Ecosystem Marketplace The Art of Integrity: State of Voluntary Carbon Markets, Q3 Insights Briefing. Washington DC, *Forest Trends Association*, 2022, p. 21.
- Dymov A. A., Vlijanie sploshnyh rubok v boreal'nyh lesah Rossii na pochvy (obzor) (The effect of continuous logging in boreal forests of Russia on soils (review)), *Pochvovedenie*, 2017, No 7, pp. 787–798.

- Dymov A. A., Starcev V. V., *Izmenenie temperaturnogo rezhima podzolistyh pochv v processe estestvennogo lesovozobnovlenija posle sploshnyh rubok* (Changes in the temperature regime of podzolic soils in the process of natural reforestation after continuous logging, *Pochvovedenie*, 2016, No 5, pp. 599–608.
- Fedorov B. G., *Rossijskij uglerodnyj balans: monografija* (Russian carbon balance: monograph), Moscow: Nauchnyj konsul'tant, 2017, 82 p.
- FIA. Forest Inventory Analysis National Program, USFS, *USDA Forest Service*, 2020, available at: <https://www.fia.fs.fed.us/> (June 24, 2022).
- Finér L., Domisch T., Dawud S. M., Raulund-Rasmussen K., Vesterdal L., Bouriaud O., Valladares F., Conifer proportion explains fine root biomass more than tree species diversity and site factors in major European forest types, *Forest Ecology and Management*, 2017, Vol. 406, pp. 330–350.
- Fischer H., Bens O., Hüttl R., Veränderung von Humusform, -vorrat und -verteilung im Zuge von Waldumbau-Maßnahmen im Nordostdeutschen Tiefland, *Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter forstliches Jahrbuch*, 2002, Vol. 121, No 6, pp. 322–334.
- Fröberg M., Hansson K., Kleja D. B., Alavi Gh., Dissolved organic carbon and nitrogen leaching from Scots pine, Norway spruce and silver birch stands in southern Sweden, *Forest ecology and management*, 2011, Vol. 262, No 9, pp. 1742–1747.
- Gamfeldt L., Snäll T., Bagchi R., Jonsson M., Gustafsson L., Kjellander P., Bengtsson J., Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species, *Nature communications*, 2013, Vol. 4, No 1, pp. 1–8.
- Georgiadis P., Vesterdal L., Stupak I., Raulund-Rasmussen K., Accumulation of soil organic carbon after cropland conversion to short rotation willow and poplar, *GCB Bioenergy*, 2017, Vol. 9, No 8, pp. 1390–1401.
- Gillingham K., Stock J. H., The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions, *Journal of Economic Perspectives*, 2018, No 32 (4), pp. 53–72.
- Gross C. D., James J. N., Turnblom E. C., Harrison R. B., Thinning treatments reduce deep soil carbon and nitrogen stocks in a coastal pacific northwest forest, *Forests*, 2018, Vol. 9, No 5, Article 238.
- Guo L. B., Gifford R. M., Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis, *Global change biology*, 2002, Vol. 8, No 4, pp. 345–360.
- Hanina L. G., Bobrovskij M. V., Komarov A. S., Mihajlov A. V., Byhovec S. S., Luk'janov A. M., Modelirovanie dinamiki raznoobrazija lesnogo napochvennogo pokrova (Modeling the dynamics of diversity of forest ground cover), *Lesovedenie*, 2006, No 1, pp. 70–80.
- Holden S. R., Treseder K. K., A meta-analysis of soil microbial biomass responses to forest disturbances, *Frontiers in microbiology*, 2013, Vol. 4, Article 163.

- Hoffmann T., Schlummer M., Notebaert B., Verstraeten G., Korup O., Carbon burial in soil sediments from Holocene agricultural erosion, Central Europe, *Global Biogeochemical Cycles*, 2013, Vol. 27, No 3, pp. 828–835.
- Hoover C. M., Management impacts on forest floor and soil organic carbon in northern temperate forests of the US, *Carbon balance and management*, 2011, Vol. 6, No 1, pp. 1–8.
- Huang L., Liu J., Shao Q., Xu X., Carbon sequestration by forestation across China: Past, present, and future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, Vol. 16, No 2, pp. 1291–1299.
- Hyvönen R., Kaarakka L., Leppälammil-Kujan-suu J., Olsson B. A., Palviainen M., Vegerfors-Persson B., Helmisaari H. S., Effects of stump harvesting on soil C and N stocks and vegetation 8–13 years after clear-cutting, *Forest Ecology and Management*, 2016, Vol. 371, pp. 23–32.
- James J., Harrison R., The effect of harvest on forest soil carbon: A meta-analysis, *Forests*, 2016, Vol. 7, No 12, Article 308.
- Johnson K., Scatena F. N., Pan Y., Short- and long-term responses of total soil organic carbon to harvesting in a northern hardwood forest, *Forest Ecology and Management*, 2010, Vol. 259, pp. 1262–1267.
- Johnson D. W., Curtis P. S., Effects of forest management on soil C and N storage: meta-analysis, *Forest ecology and management*, 2001, Vol. 140, No 2–3, pp. 227–238.
- Jurevics A., Peichl M., Olsson B. A., Ström-gren M., Egnell G., Slash and stump harvest have no general impact on soil and tree biomass C pools after 32–39 years, *Forest Ecology and Management*, 2016, Vol. 371, pp. 33–41.
- Karpechko Ju. V., Vlijanie rubok na stok s lesopokrytoj chasti vodosbora Onezhskogo ozera (The effect of logging on runoff from the forested part of the Onega Lake catchment), *Trudy KarNC RAN, Petrozavodsk*, No 2016, pp. 13–20.
- Khanina L., Bobrovsky M., Komarov A., Mikhajlov A., Modeling dynamics of forest ground vegetation diversity under different forest management regimes, *Forest Ecology and Management*, 2007, Vol. 248, pp. 80–94.
- Khanina L. G., Bobrovsky M. V., Komarov A. S., Shanin V. N., Bykhovets S. S., Model predictions of effects of different climate change scenarios on species diversity with or without management intervention, repeated thinning, for a site in Central European Russia, [in:] *Nitrogen Deposition, Critical Loads and Biodiversity*, Springer, 2014, pp. 173–182.
- Kalinina L., Chertov O., Frolov P., Goryachkin S., Kuner P., Küper J., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Lyuri D., Rusakov A., Kuzyakov Y., Giani L., Alteration process during the post-agricultural restoration of Luvisols of the temperate broad-leaved forest in Russia, *Catena*, 2018, Vol. 171, pp. 602–612.

- Katzensteiner K., Effects of harvesting on nutrient leaching in a Norway spruce (*Picea abies* Karst.) ecosystem on a Lithic Leptosol in the Northern Limestone Alps, *Plant and Soil*, 2003, Vol. 250, No 1, pp. 59–73.
- Keller A. B., Brzostek E. R., Craig M. E., Fisher J. B., Phillips R. P., Root-derived inputs are major contributors to soil carbon in temperate forests, but vary by mycorrhizal type, *Ecology Letters*, 2021, Vol. 24, No 4, pp. 626–635.
- Kim S., Han S. H., Li G., Yoon T. K., Lee S. T., Kim C., Son Y., Effects of thinning intensity on nutrient concentration and enzyme activity in *Larix kaempferi* forest soils, *Journal of Ecology and Environment*, 2016, Vol. 40, No 1, pp. 1–7.
- Klein D., Fuentes J. P., Schmidt A., Schmidt H., Schulte A., Soil organic C as affected by silvicultural and exploitative interventions in *Nothofagus pumilio* forests of the Chilean Patagonia, *Forest Ecology and Management*, 2008, Vol. 255, No 10, pp. 3549–3555.
- Kohout P., Charvátová M., Štursová M., Mašíňová T., Tomšovský M., Baldrian P., Clearcutting alters decomposition processes and initiates complex restructuring of fungal communities in soil and tree roots, *The ISME journal*, 2018, Vol. 12, No 3, pp. 692–703.
- Komarov A., Chertov O., Bykhovets S., Shaw C., Nadporozhskaya M., Frolov P., Shashkov M., Shanin V., Grabarnik P., Priputina I., Zubkova E., Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing, *Ecological Modelling*, 2017, Vol. 345, pp. 113–124.
- Kondrat'ev S. A., *Formirovanie vneshnej nagruzki na vodoemy: problemy modelirovaniya* (Formation of external load on reservoirs: modeling problems), Saint Petersburg: Nauka, 2007, 255 p.
- Kondrat'ev S. A., Kazmina M. V., Shmakova M. V., Markova E. G., Metod rascheta biogennoj nagruzki na vodnye ob'ekty (Method of calculation of biogenic load on water bodies), *Regional'naja jekologija*, 2011, No 3–4, pp. 50–59.
- Kondrat'ev S. A., Karpechko Ju. V., Shmakova M. V., Rasulova A. M., Rodionov V. Z., Opyt jeksperimental'nyh issledovanij i matematicheskogo modelirovaniya vozdeystvij vyrubki lesa i posledujushhego lesovosstanovlenija na stok i vynos himicheskikh veshhestv s lesnyh vodosborov (Experience of experimental research and mathematical modeling of the effects of deforestation and subsequent reforestation on the runoff and removal of chemicals from forest catchments), *Regional'naja jekologija*, 2019, No 1 (55), pp. 25–53.
- Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V., Izuchenie formirovaniya stoka s rechnyh vodosborov metodami matematicheskogo modelirovaniya (na primere bassejna Ladozhskogo ozera) (Studying the formation of runoff from river catchments by mathematical modeling methods

- (on the example of the Ladoga Lake basin)), *Sbornik nauchnyh trudov 12 s"ezda Russkogo geograficheskogo obshchestva* (Collection of scientific papers of the 12th Congress of the Russian Geographical Society), Saint Petersburg: Nauka, 2005, Vol. 6, pp. 99–104.
- Kuznecova A. I., Gornov A. V., Gornova M. V., Teben'kova D. N., Nikitina A. D., Kuznecov V. A., Ocenka vynosy ugleroda s pochvennymi vodami v dominirujushhix tipah lesa Brjanskogo Poles'ja (Assessment of carbon removal from soil waters in the dominant forest types of the Bryansk Polesie), *Pochvovednie*, 2022, No 9, pp. 1086–1097.
- Kuznetsova A. I., Geraskina A. P., Lukina N. V., Smirnov V. E., Tikhonova E. V., Shevchenko N. E., Gornov A. V., Ruchinskaya E. V., Tebenkova D. N., Linking vegetation, soil carbon stocks, and earthworms in upland coniferous–broadleaf forests, *Forests*, 2021, No 12 (9), Article 1179.
- Kuznecova A. I., Lukina N. V., Gornov A. V., Gornova M. V., Tikhonova E. V., Smirnov V. Je., Danilova M. A., Teben'kova D. N., Braslavskaja T. Ju., Kuznecov V. A., Tkachenko Ju. N., Genikova N. V., Zapasy ugleroda v peschanyh pochvah osnovnyh lesov na zapade Rossii (Carbon reserves in sandy soils of pine forests in western Russia), *Pochvovedenie*, 2020, No 8, pp. 959–969.
- Kreutzer K., Deschu E., Hösl G., Vergleichende Untersuchungen über den Einfluß von Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) auf die Sickerwasserqualität, *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 1986, Vol. 105, pp. 364–371.
- Kulmala L., Aaltonen H., Berninger F., Kieloaho A. J., Levula J., Bäck J., Pumpanen J., Changes in biogeochemistry and carbon fluxes in a boreal forest after the clear-cutting and partial burning of slash, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, Vol. 188, pp. 33–44.
- Laganier J., Angers D. A., Pare D., Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis, *Global change biology*, 2010, Vol. 16, No 1, pp. 439–453.
- Lee J. G., Lee D. H., Jeong J. Y., Lee S. G., Han S. H., Kim S. J., Kim H. J., The Effects of Stand Density Control on Carbon Cycle in *Chamaecyparis obtusa* (Siebold and Zucc.) Endl., *Forests*, 2023, Vol. 14 (2), Article 217.
- Lemus R., Lal R., Bioenergy crops and carbon sequestration, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2005, Vol. 24, No 1, pp. 1–21.
- Li Y., Bruelheide H., Scholten T., Schmid B., Sun Z., Zhang N., Bu W., Liu X., Ma K., Early positive effects of tree species richness on soil organic carbon accumulation in a large-scale forest biodiversity experiment, *Journal of Plant Ecology*, 2019, Vol. 12, No 5, pp. 882–893.
- Lippke B., Puettmann M., Oneil E., Oliver C. D., The plant a trillion trees campaign to reduce global warming — Fleshing out the concept, *Journal of Sustainable Forestry*, 2021, Vol. 40. No 1, pp. 1–31.
- Lippke B., Puettmann M. E., Oneil E., CORRIM Tech Note 1. Effective uses of forest de-

- rived products to reduce carbon emissions, *The Consortium for Research on Renewable Industrial Materials*, 2020, available at: <https://corrim.org/use-of-forest-products-to-reduce-carbon-emissions/> (June 24, 2022).
- Lukina N. V., Geraskina A. P., Kuznecova A. I., Smirnov V. Je., Gornov A. V., Shevchenko N. E., Tihonova E. V., Teben'kova D. N., Basova E. V., Funkcional'naja klassifikacija lesov: aktual'nost' i podhody k razrabotke (Functional classification of forests: relevance and approaches to development), *Lesovedenie*, 2021, No 6, pp. 566–580.
- Mallik A. U., Hu D., Soil respiration following site preparation treatments in boreal mixedwood forest, *Forest Ecology and Management*, 1997, Vol. 97, No 3, pp. 265–275.
- Mayer M., Sandén H., Rewald B., Godbold D. L., Katzensteiner K., Increase in heterotrophic soil respiration by temperature drives decline in soil organic carbon stocks after forest windthrow in a mountainous ecosystem, *Functional Ecology*, 2017, Vol. 31, No 5, pp. 1163–1172.
- Michaelowa A., Hermwille L., Obergassel W., Butzengeiger S., Additionality revisited: guarding the integrity of market mechanisms under the Paris Agreement, *Climate Policy*, 2019, Vol. 19, No 10, pp. 1211–1224.
- Morris D. M., Hazlett P. W., Fleming R. L., Kwiaton M. M., Hawdon L. A., Leblanc J. D., Weldon T. P., Effects of Biomass Removal Levels on Soil Carbon and Nutrient Reserves in Conifer Dominated, Coarse Textured Sites in Northern Ontario: 20 Year Results, *Soil Science Society of America Journal*, 2019, Vol. 83, pp. 116–132.
- Mushinski R. M., Gentry T. J., Boutton T. W., Forest organic matter removal leads to long-term reductions in bacterial and fungal abundance, *Applied Soil Ecology*, 2019, Vol. 137, pp. 106–110.
- Nave L. E., Domke G. M., Hofmeister K. L., Mishra U., Perry C. H., Walters B. F., Swanston C. W., Reforestation can sequester two petagrams of carbon in US topsoils in a century, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, Vol. 115, No 11, pp. 2776–2781.
- Nave L. E., Vance E. D., Swanston C. W., Curtis P. S., Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests, *Forest Ecology and Management*, 2010, Vol. 259, No 5, pp. 857–866.
- Noormets A., Epron D., Domec J. C., McNulty S. G., Fox T., Sun G., King J. S., Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: A review and hypothesis, *Forest Ecology and Management*, 2015, Vol. 355, pp. 124–140.
- Oliver C. D., Nassar N. T., Lippke B. R., McCarter J. B., Carbon, fossil fuel, and biodiversity mitigation with wood and forests, *Journal of Sustainable Forestry*, 2014, Vol. 33, No 3, pp. 248–275.
- Oneil E. E., Lippke B. R., Integrating products, emission offsets, and wildfire into carbon assessments of Inland Northwest forests,

- Wood and Fiber Science*, 2010, Vol. 42, pp. 144–164.
- Pan Y., Birdsey R. A., Fang J., Houghton R., Kauppi P. E., Kurz W. A., Hayes D. A., Large and persistent carbon sink in the world's forests, *Science*, 2011, Vol. 333, No 6045, pp. 988–993.
- Pang X., Hu B., Bao W., de Oliveira Vargas T., Tian G., Effect of thinning-induced gap size on soil CO₂ efflux in a reforested spruce forest in the eastern Tibetan Plateau, *Agricultural and forest meteorology*, 2016, Vol. 220, pp. 1–9.
- Parizhskoe soglashenie*, 2015, available at: <https://golnk.ru/oMxvm>, (February 08, 2022)
- Paul K. I., Polglase P. J., Nyakuengama J. G., Khanna P. K., Change in soil carbon following afforestation, *Forest ecology and management*, 2002, Vol. 168, No 1–3, pp. 241–257.
- Persson T., Lenoir L., Vegerfors B., Long-term effects of stump harvesting and site preparation on pools and fluxes of soil carbon and nitrogen in central Sweden, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, Vol. 32, No 3, pp. 222–229.
- Pötzelsberger E., Hasenauer H., Soil change after 50 years of converting Norway spruce dominated age class forests into single tree selection forests, *Forest Ecology and Management*, 2015, Vol. 338, pp. 176–182.
- Prescott C. E., Blevins L. L., Staley C. L., Effects of clear-cutting on decomposition rates of litter and forest floor in forests of British Columbia, *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, Vol. 30, No 11, pp. 1751–1757.
- Pretzsch H., Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures, *Forest Ecology and Management*, 2014, Vol. 327, pp. 251–264.
- Pretzsch H., Diversity and productivity in forests: evidence from long-term experimental plots, *Forest diversity and function*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, pp. 41–64.
- Priputina I. V., Frolova G. G., Shanin V. N., Vybor optimal'nyh shem posadki lesnyh kul'tur: komp'juternyj jeksperiment (Choosing optimal planting schemes for forest crops: a computer experiment), *Komp'juternye issledovaniya i modelirovanie*, 2016, Vol. 8, No 2, pp. 333–343.
- Puhlick J. J., Fernandez I. J., Weiskittel A. R., Evaluation of forest management effects on the mineral soil carbon pool of a lowland, mixed-species forest in Maine, USA, *Canadian journal of soil science*, 2016, Vol. 96, No 2, pp. 207–218.
- Pumpanen J., Westman C. J., Ilvesniemi H., Soil CO₂ efflux from a podzolic forest soil before and after forest clear-cutting and site preparation, *Boreal Environment Research*, 2004, Vol. 9, pp. 199–212.
- Resh S. C., Binkley D., Parrotta J. A., Greater soil carbon sequestration under nitrogen-fixing trees compared with *Eucalyptus species*, *Ecosystems*, 2002, Vol. 5, No 3, pp. 217–231.
- Rezolucija po itogam nauchnyh debatov "Lesnye klimaticheskie proekty v Rossii"*, Moscow, 2021, 19 October, available at: <https://goo.su/ITAB>, (February 08, 2022).

- Richter D. D., Markewitz D., Trumbore S. E., Wells, C. G., Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest, *Nature*, 1999, Vol. 400, No 6739, pp. 56–58.
- Rytter R. M., Rytter L., Changes in soil chemistry in an afforestation experiment with five tree species, *Plant and Soil*, 2020, No 456, pp. 425–437.
- Rytter R. M., The potential of willow and poplar plantations as carbon sinks in Sweden, *Biomass and Bioenergy*, 2012, Vol. 36, pp. 86–95.
- Schmidt M. G., Macdonald S. E., Rothwell R. L., Impacts of harvesting and mechanical site preparation on soil chemical properties of mixed-wood boreal forest sites in Alberta, *Canadian Journal of Soil Science*, 1996, Vol. 76, No 4, pp. 531–540.
- Shanin V. N., Frolov P. V., Korotkov V. N., Vsegda li iskusstvennoe lesovosstanovlenie mozhet byt' lesoklimaticheskim proektom (Can artificial reforestation always be a forest-climatic project), *Voprosy lesnoj nauki*, 2022, Vol. 5, No 2, pp. 103–139.
- Shanin V., Juutinen A., Ahtikoski A., Frolov P., Chertov O., Rämö J., Lehtonen A., Laiho R., Mäkiranta P., Nieminen M., Laurén A., Sarkkola S., Penttilä T., Ľupek B., Mäkipää R., Simulation modelling of greenhouse gas balance in continuous-cover forestry of Norway spruce stands on nutrient-rich drained peatlands, *Forest Ecology and Management*, 2021, Vol. 496, Article 119479.
- Special'nye lesoklimaticheskie proekty mogut sposobstvovat' snizheniju uglerodnogo naloga, kotoryj Evrosojuz planiruet vvesti v 2025 godu* (Special forest-climatic projects can contribute to reducing the carbon tax, which the European Union plans to introduce in 2025), 2021, available at: <http://www.igras.ru/news/2719> (February 07, 2022).
- Streck C., REDD+ and leakage: debunking myths and promoting integrated solutions, *Climate Policy*, 2021, Vol. 21 (6), pp. 843–52.
- Strömgren M., Egnell G., Olsson B. A., Carbon stocks in four forest stands in Sweden 25 years after harvesting of slash and stumps, *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 290, pp. 59–66.
- Strukelj M., Brais S., Paré D., Nine-year changes in carbon dynamics following different intensities of harvesting in boreal aspen stands, *European journal of forest research*, 2015, No 134, pp. 737–754.
- Tang J., Bolstad P. V., Martin J. G., Soil carbon fluxes and stocks in a Great Lakes forest chronosequence, *Global Change Biology*, 2009, Vol. 15, No 1, pp. 145–155.
- The greenhouse gas protocol. The land use, land-use change, and forestry guidance for GHG project accounting*, Washington: Word Resource Institute, 2006, 97 p., available at: <https://goo.su/puTzd> (September 08, 2022).
- Thiffault E., Hannam K. D., Paré D., Titus B. D., Hazlett P. W., Maynard D. G., Brais S., Ef-

- fects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests—A review, *Environmental Reviews*, 2011, Vol. 19, pp. 278–309.
- Transformacija jekosistem severa v zone intensivnoj zagotovki drevesiny (Transformation of ecosystems of the North in the zone of intensive wood harvesting), *Tr. Komi nauchnogo centra UrO RAN, Syktyvkar*, 1996. No 154, 160 p.
- Vanguelova E. I., Pitman R., Benham S., Perks M., Morison J. I., Impact of tree stump harvesting on soil carbon and nutrients and second rotation tree growth in Mid-Wales, UK, *Open Journal of Forestry*, 2017, Vol. 7, No 1, Article ID 73642.
- Verified Carbon Standard, v 4.2, Issued: 2019, 19 September, available at: <https://goosu/x0mw> (June 24, 2022).
- Vesterdal L., Dalsgaard M., Felby C., Raulund-Rasmussen K., Jørgensen B. B., Effects of thinning and soil properties on accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus in the forest floor of Norway spruce stands, *Forest Ecology and Management*, 1995, Vol. 77, No 1–3, pp. 1–10.
- Vesterdal L., Raulund-Rasmussen K., Forest floor chemistry under seven tree species along a soil fertility gradient, *Canadian journal of forest research*, 1998, Vol. 28, No 11, pp. 1636–1647.
- Vesterdal L., Ritter E., Gundersen P., Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land, *Forest ecology and management*, 2002, Vol. 169, No 1–2, pp. 137–147.
- Vesterdal L., Clarke N., Sigurdsson B. D., Gundersen P., Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *Forest Ecology and Management*, 2013, Vol. 309, pp. 4–18.
- Volk T. A., Verwijst T., Tharakan P. J., Abrahamson L. P., White E. H., Growing fuel: a sustainability assessment of willow biomass crops, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, Vol. 2 (8), pp. 411–418.
- Walmsley J. D., Jones D. L., Reynolds B., Price M. H., Healey J. R., Whole tree harvesting can reduce second rotation forest productivity, *Forest Ecology and Management*, 2009, Vol. 257, No 3, pp. 1104–1111.
- Warren K. L., Ashton M. S., Change in soil and forest floor carbon after shelterwood harvests in a New England Oak–Hardwood Forest, USA, *International Journal of Forestry Research*, 2014, Vol. 2014, Article ID 527236.
- Wiesmeier M., Prietzel J., Barthold F., Spörlein P., Geuß U., Hangen E., Kögel-Knabner I., Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria)—Implications for carbon sequestration, *Forest ecology and management*, 2013, Vol. 295, pp. 162–172.
- Zabowski D., Chambreau D., Rotramel N., Thies W. G., Long-term effects of stump removal to control root rot on forest soil bulk density, soil carbon and nitrogen content, *Forest Ecology and Management*, 2008, Vol. 255, No 3–4, pp. 720–727.
- Zakonoproekt No 1116605–7 Ob ogranichenii vybrosov parnikovyh gazov* (On limit-

ing greenhouse gas emissions), available at: <https://goo.su/LSlh9h> (February 08, 2022).

Zhang X. Guan D., Li W., Sun D., Jin C., Yuan F., Wu J., The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: A meta-

analysis, *Forest Ecology and Management*, 2018, Vol. 429, pp. 36–43.

Zhou D., Zhao S. Q., Liu S., Oeding J., A meta-analysis on the impacts of partial cutting on forest structure and carbon storage, *Biogeosciences*, 2013, Vol. 10, pp. 3691–3703.

IMPACT OF SILVICULTURAL PRACTICES ON SOIL CARBON: A REVIEW

D. N. Tebenkova, D. V. Gichan, Yu. N. Gagarin

*Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997, Russia*

E-mail: tebenkova.dn@gmail.com

Received: 20.11.2022

Revised: 18.12.2022

Accepted: 20.12.2022

The paper provides a review of Russian and foreign articles regarding studying the impact of silvicultural practices on the soil carbon pool to assess the effectiveness of forest carbon projects. Analyzing the works allowed us to conclude that silvicultural practices affect the content of soil carbon through a change in the rate of influx and decomposition of organic matter and, as a result, affect the redistribution of carbon in the soil profile. High-intensity felling, including clear felling, removal of logging residues, damage to the ground cover when planting forest crops, and the development of monocultures can negatively affect the soil carbon pool. On the contrary, selective and low-intensity thinning, leaving logging residues, and planting mixed forest stands, especially on abandoned agricultural lands, proved to be promising forest management practices that contribute to the accumulation and conservation of soil carbon.

Key words: *carbon, soil, forest carbon projects, silvicultural practices*

Рецензент: к. б. н. Киселева В. В.