

ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ И УГЛЕРОДНАЯ НЕЙТРАЛЬНОСТЬ

Р. Р. Байтурина¹², Р. Р. Султанова¹², А. К. Габделхаков¹, А. А. Габитова¹²

¹Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

²Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Цель углеродной нейтральности важна для снижения воздействия изменения климата, предотвращения разрушения экосистем и сохранения планеты для будущих поколений. Проекты по поглощению углерода на суше, такие как посадка деревьев, являются одной из основных стратегий компенсации выбросов углерода. Целью работы стало проведение анализа лесовосстановительных мероприятий в условиях климатических изменений. В статье характеристика насаждений для осуществления анализа на территории Республики Башкортостан базируется на анализ данных лесного фонда, документов по лесоустройству, материалов маршрутных обследований. Выявлено постепенное смещение лесообразующих пород. В целях выработки четких мер по адаптации лесного хозяйства и стабилизации экологического баланса изучаемые вопросы важны для дальнейшего прогнозирования трансформационных процессов и выработки рекомендуемых мероприятий совместными усилиями научных и природоохранных организаций, а также органов власти. Актуализировалась необходимость развития проектов о лесоклиматических и технологических углеродных единицах, дополнения Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации статьей о климатических инициативах, сокращения выбросов за счёт наилучших доступных технологий и/или механизмов компенсации. При этом важно, чтобы российские климатические проекты соответствовали международно признанным стандартам.

Ключевые слова: лесовосстановление, углекислый газ (CO₂), углеродная нейтральность, углеродный след, плантационное лесоразведение, Республика Башкортостан

REFORESTATION AND CARBON NEUTRALITY

R. R. Baiturina¹², R. R. Sultanova¹², A. K. Gabdelkhakov¹, A. A. Gabitova¹²

¹Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

²Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia

The goal of carbon neutrality is important to reduce the impact of climate change, prevent the destruction of ecosystems and preserve the planet for future generations. Carbon sequestration projects on land, such as tree planting, are one of the main strategies for offsetting carbon emissions. The aim of the work was to analyze the impact of reforestation measures in the conditions of climate change. In the article, the characteristics of plantings for analysis on the territory of the Republic of Bashkortostan are based on the use of forest fund data, forest management documents, route survey materials. Gradual displacement of forest-forming rocks was revealed. In order to develop clear measures to adapt forestry and stabilize the ecological balance, the issues studied are important for further forecasting of transformational processes and the development of recommended measures through the joint efforts of scientific and environmental organizations, as well as authorities. There is a need to develop projects on forest-climatic and technological carbon units, the need to supplement the Development Strategy of the Forest Complex of the Russian Federation with an article on climate initiatives, reducing emissions through the best available technologies and/or compensation mechanisms. At the same time, it is important that Russian climate projects comply with internationally recognized standards.

Keywords: reforestation, carbon dioxide (CO₂), carbon neutrality, carbon footprint, plantation forest cultivation, Republic of Bashkortostan

Введение

Изменение землепользования, вызванное деятельностью человека, является одним из факторов, способствующих текущей концентрации парниковых газов (Pörtner et al., 2022) в атмосфере. Снижение выбросов парниковых газов имеет огромное значение, поскольку их сокращение окажет непосредственное влияние на глобальную климатическую систему (Bastin et al., 2019) и может способствовать достижению целей Парижского соглашения. Для достижения амбициозной цели в 1,5 °C, поставленной этим соглашением, требуется существенное сокращение обезлесения и связанных с ним выбросов CO₂, причем к 2030 г. этот показатель должен составлять примерно 70 %, а к 2050 г. – 95 % (Парижское соглашение, 2015; Roe et al., 2019). Более того, восстановление и зарастание лесов, ведущее к секвестрации CO₂, должно оставаться основной стратегией снижения воздействия на окружающую среду (Goetz et al., 2015).

Однако масштабы и распределение возможностей по смягчению последствий изменения климата за счет сохранения, восстановления или увеличения площади лесов изучены недостаточно (Aragón et al., 2021). Одной из основных проблем при разработке проектов компенсации углерода на субнациональном и национальном уровнях является неопределенность, связанная с пространственным распределением углерода, запасенного в наземной биомассе (Cuesta et al., 2023; Курбанов и др., 2010).

Углеродная нейтральность означает достижение баланса между выделением и поглощением углерода в атмосфере земли. Это возможно при снижении выбросов парниковых газов (ПГ), в т.ч. CO₂, и за счет поглощения их растительностью.

Углеродная нейтральность возможна:

- при уменьшении выбросов ПГ. Это может быть достигнуто путем снижения потребления энергии, эффективного использования ресурсов, применения возобновляемых источников энергии и т.д.;
- повышении энергетической эффективности. Это включает улучшение энергоэффективности зданий, транспортных средств, промышленных процессов и т.д.;
- использовании возобновляемых источников энергии. Замена ископаемых видов топлива на возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, ветровая и гидроэнергия, помогает сократить выбросы углерода;
- компенсации выбросов через поглощение углерода. Растительность, особенно лесные массивы, являются естественными поглотителями углерода из атмосферы. Поэтому важно сохранять и восстанавливать леса, а также применять технологии захвата и хранения углерода;
- вовлечении общественности и бизнеса. Достижение углеродной нейтральности требует совместных усилий всех секторов общества. Вовлечение бизнеса, правительственных организаций, некоммерческих организаций и общественности в разработку и реализацию стратегий углеродной нейтральности является необходимым.

Достижение углеродной нейтральности важно для снижения воздействия изменения климата, предотвращения разрушения экосистем и сохранения планеты для будущих поколений.

Проекты по поглощению углерода на суше, такие как посадка деревьев, являются одной из основных стратегий компенсации выбросов углерода. Однако при этом мы рискуем свести природные экосистемы к одному показателю – углероду. Акцент на восстановлении экосистем для обеспечения баланса между экосистемными услугами, сохранением биоразнообразия и

поглощением углерода является более правильной стратегией защиты их функционирования (Курбанов и др., 2008).

Нарастающая угроза изменения климата послужила толчком к принятию глобальных обязательств по достижению нулевого уровня выбросов к середине текущего столетия. Для достижения баланса между сокращением источников выбросов и увеличением поглотителей ПГ в качестве важной стратегии компенсации выбросов рассматривается связывание углерода на суше, в первую очередь с помощью природных решений. Коммерциализация углерода и значительный рост добровольного углеродного рынка привели к бурному росту числа коммерческих проектов по посадке деревьев в тропических экосистемах со значительными финансовыми потоками из частного и государственного секторов в проекты по компенсации выбросов углерода. На практике эти проекты по компенсации углерода чаще всего реализуются в форме увеличения надземного углерода за счет древесной биомассы (Меры по борьбе с изменением климата, 2023).

«...лесоклиматические проекты стали основными и наиболее проработанными на сегодняшний день способами декарбонизации», – говорится в пресс-релизе Рослесинфорга. Ведомство уточняет, что условия для работы инвесторов в этой сфере созданы. В Сахалинской области в рамках первого зарегистрированного в реестре лесоклиматического проекта, направленного на достижение регионом углеродной нейтральности длительностью 75 лет, на общей площади 6,0 тыс. га с 01.09.2022 по 31.12.2028 создаются лесные культуры по особой технологии, которые дополняют эксперимент по ограничению выбросов ПГ (В реестре углеродных единиц ..., 2023).

Расчет углеродного следа (УС) – важная задача для организации стран, где ведутся отчеты о выбросах ПГ и введен углеродный налог. Экологичность здесь является трендом для предприятий, которые включаются в «зеленые» инициативы. Применяемой методикой оценки и учета углеродного следа является «Протокол по выбросам парниковых газов» (GHG Protocol), позволяющий определить УС как общее количество выбросов ПГ от деятельности предприятия. Существует методика оценки углеродного следа ISO 14067:2018 «Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification». Российский аналог – ГОСТ Р 56276–2014/ISO/TS 14067:2013 «Газы парниковые. Углеродный след продукции» (введен в 2016 г.) (Углеродный след в России и мире, 2023).

Аналитическая компания Wood Mackenzie в области возобновляемых источников энергии, энергетики и природных ресурсов смоделировала сценарии энергоперехода и достижения углеродной нейтральности. Компания оценила глобальные инвестиции для достижения нулевого уровня выбросов ПГ к 2050 году в размере 2,7 триллиона долларов ежегодно.

Снижение глобальных выбросов до доиндустриального уровня и достижение чистого нуля – одна из важнейших задач, стоящих перед человечеством. Ускорение энергетического перехода имеет решающее значение для остановки изменения климата и ограничения его разрушительного воздействия. В новом межведомственном докладе (Женева, 14 сентября 2023 г.), подготовленном при координации Всемирной метеорологической организации (ВМО), говорится, что на планете сохраняется вероятность потепления по прогнозам МГЭИК на 98 % и может достигнуть уровня Парижского соглашения в 1,5 °C в начале 2030-х годов. Поэтому необходимо незамедлительное сокращение выбросов ПГ (Всемирная метеорологическая ..., 2023).

Институтом глобального климата и экологии разработаны новые методологии климатических проектов: обнаружение и устранение утечек в системах добычи, переработки, транспортировки; хранения и распределения газа и на нефтеперерабатывающих предприятиях, улучшенное управления лесным хозяйством, в том числе охрана лесов от пожаров; улучшенное управления лесным хозяйством, в том числе снижение воздействия лесозаготовок; а также лесовосстановление.

Особое значение имеет ассортимент для лесовосстановления. К примеру, по метаанализу (Laganiere et al., 2010) запасы почвенного углерода через 20-30 лет после облесения широколиственными породами увеличатся на 25 %. Согласно исследованиям Vesterdal et al. (2013) и Воџа et al. (2014), лесная подстилка содержит больше запасов почвенного углерода под хвойными, чем под широколиственными видами деревьев (Тебенькова и др., 2022). Обратные процессы наблюдаются в минеральном слое (Vesterdal et al., 2013). По математическому моделированию В. Н. Шанина и др. (2022) следует, что монокультуры *Pinus sylvestris* оказались менее эффективны в сравнении с естественным зарастанием мелколиственным древостоем. При этом прогноз показал наибольшую эффективность в накоплении углерода для смешанных культур *Pinus sylvestris* с примесью *Betula pendula* и *Populus tremula*. Смешение насаждений содействует высоким показателям запасов почвенного углерода (Pretzsch, 2014). Положительная связь между видовым разнообразием и запасом углерода в почве лесов в Швеции для умеренной и бореальной зон описана Gamfeldt et al. (2013), для лесов Китая – Li et al. (2019). На территориях Московской, Брянской областей и северо-западного Кавказа выявлена взаимосвязь между запасами углерода в минеральных горизонтах почв и разнообразием видового состава, что отражается на качестве опада (Аккумуляция углерода ..., 2018; Kuznetsova et al., 2021; Тебенькова и др., 2022). Исследования А.И. Кузнецовой и др. (2020) показали зависимость от увеличения скорости разложения опада, снижение запасов подстилки, увеличение запасов углерода в минеральном профиле от роста количества подроста лиственных видов, дающих качественный опад (Тебенькова и др., 2022). В работе Fischer et al. (2002) приведены результаты подсадки бука в сосновых насаждениях, что дает возможность накопления большего углерода в более глубоких минеральных слоях почвы. Это объясняется глубоким проникновением в почву корней бука в сравнении с сосной. Однако создание леса из *Piceae* после букового приводит к высвобождению углерода из минеральных горизонтов почвы без корней. За счет увеличения потока растворенного органического вещества из подстилки небольшая добавка быстроразлагаемого опада лиственных видов деревьев приводит к переносу углерода в минеральные горизонты почв (Cotrufo et al., 2013; Córdova et al., 2018).

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, Тебенькова и др., 2022). Исследования Huang et al. (2012) выявили потенциальную возможность увеличения запасов углерода в верхнем слое почвы, а земли с восстановленными лесами на территории США 500 млн га могут аккумулировать $1,3-2,1 \cdot 10^9$ т С в течение века ($13-21 \cdot 10^6$ т С г⁻¹) (Тебенькова и др., 2022).

Эксперты Научного совета Российской академии наук по лесу (Резолюция ..., 2021) считают лесоразведение перспективным видом лесных климатических проектов для России, в том числе плантационное на зарастаемых сельскохозяйственных землях. По оценкам

Р. М. Риттер и Л. Риттер (Rytter R. M., Rytter L., 2020), на плантациях *Pópulus*, *P. trémula*, *Bétula péndula*, *Picea ábies*, *Lárix* в Швеции на пахотных землях скорость накопления запасов углерода колебалась от нуля до 2,3-4,9 т С га⁻¹ год⁻¹. Выявлено накопление углерода в древесной биомассе плантациями *Pópulus* и *Sálìx* на землях, бывших в сельскохозяйственном пользовании, в объеме 76,6-80,1 т С га⁻¹. По данным Lemus и Lal (2005), в условиях США при выращивании *Pópulus* и *Sálìx* для биотоплива, скорость накопления углерода насчитывала соответственно 3,4 и 4,3 т С га⁻¹ год⁻¹ и в почвах – по 0,9 и 1,9 т С га⁻¹ год⁻¹. Выявленные под 24-летними плантациями *Sálìx* и *Pópulus* запасы углерода в 1,5 раза выше по сравнению с безлесной территорией (Georgiadis et al., 2017). В условиях Республики Марий Эл для плантаций *P. trémula* в зависимости от схемы посадки за 30 лет почвенные запасы углерода увеличились от 6,6 до 19,5 т га⁻¹ (Припутина и др., 2016).

В масштабах мира отмечается сокращение лесных культур по площадям до 290 млн га, при этом на плантации лесных культур приходится 3 % (131 млн га) и 45 % от общей площади лесов, а возобновляемые леса занимают 3,765 млрд га. В России плантационному лесовыращиванию уделяется недостаточное внимание в сравнении с обычными лесными культурами. В Южной Америке плантационные леса занимают 99 % от площадей лесных культур и 2 % от площадей лесов, в Европе – 6 % от площади всех лесных культур и 0,4 % от общей площади лесов (Global Forest ..., 2020). При этом 44 % плантационных лесных культур в мире являются интродуцентами. Южная Америка использует интродуцированные, а Северная и Центральная Америка – местные виды. В Азии 65 % площади лесов состоят из аборигенных видов, а в Африке – на 70 % из интродуцированных видов. На территории Бразилии, Канады и России более 60 % леса являются экологически целостными, в мире их насчитывается около 1,11 млрд га (Global Forest ..., 2020).

В вопросах воспроизводства лесов правительство Китая значительное внимание уделяет лесным плантациям (77 млн га), во-первых, как одному из способов улучшения материального положения сельского населения при одновременном выращивании сельскохозяйственной продукции и древесных видов, во-вторых, поощряя создание лесных питомников, центров хранения, сбора, обработки семян, направлений по воспроизводству лесов (Штукин, 2019; Global Forest ..., 2020). Лесные плантации в Канаде получают уже в сорокалетнем возрасте максимальный прирост и запас 300 м³ га⁻¹. Широко выращивают на лесных плантациях тополя для получения древесной массы, а также применяют их для древесной биомассы с целью производства биотоплива (пеллеты, брикеты). О высокой производительности говорят следующие показатели по среднему приросту на плантациях лиственницы Квебека: от 5 до 8 м³га⁻¹ в пятилетнем возрасте (пиловочник возможен в двадцатилетнем возрасте) (Штукин, 2019; Global Forest ..., 2020). В США опыт плантационного лесовыращивания развивается с давних времен. Сегодня создано более ста тридцати основных лесных питомников, где ежегодно выращивается свыше 900 млн экз. деревьев (Штукин, 2019; Global Forest ..., 2020).

Результаты селекционной работы, которая началась ещё 30 лет назад, представили воронежские учёные – это уникальные саженцы беспухового тополя, только за первый год вырастающие на 2 м. У них огромные листья, а поглощающая способность в несколько раз выше, чем у обычного дерева. Эти саженцы активно используются в лесоклиматической программе «Зелёная формула» (Мякотникова, 2023).

Согласно «Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» и 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых

газов» (вступил в силу в конце 2021 г.) с 1 июля 2022 года все предприятия, у которых выбросы превышают 150 тыс. т эквивалента CO₂, сдают обязательную отчётность.

Крупное предприятие, развивая производство, должно использовать наилучшие доступные технологии, позволяющие сокращать выбросы. А вот то, что в нынешних условиях сократить невозможно, нужно постепенно компенсировать. Тут на помощь и приходят природные проекты, в том числе лесоклиматические. В разных странах установлены разные лимиты на компенсационные меры (от 5 % до 35 %). Но 100 % нет практически нигде. В 2022 году на ВЭФ объявили о создании Реестра углеродных единиц, и уже его запустили. В нём зарегистрированы первые проекты, проведены тестовые сделки. Есть такие углеродные единицы, которые котируются меньше доллара. В России сейчас индикатив цены просматривается в рамках сахалинского эксперимента – размер штрафа за превышение квот по выбросам составляет 1 тыс. рублей. На эту планку – 1 тыс. рублей – в большей степени и ориентируется рынок. Лесоклиматические проекты котируются в районе 30 долларов. В рамках европейской торговли квотами цена варьирует от 60 до 100 евро (Мякотникова, 2023).

В связи вышесказанным **целью** настоящей статьи является анализ лесовосстановительных мероприятий в меняющихся климатических условиях для Республики Башкортостан.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования принята вся территория Республики Башкортостан (РБ), расположенная на Урале и Западно-Сибирской низменности, Предуральской равнине и степях Зауралья. Современные трансформационные процессы так или иначе сказываются на лесных экосистемах не только в мировых масштабах, но и региона. Процент покрытой лесом площади в регионе неравномерный и колеблется от юго-западных районов – 6, к восточным и северо-восточным – до 60 единиц (Формы отчета ..., 2019; Лесной план ..., 2018). Регион охвачен разными природными зонами: хвойно-широколиственных лесов, лесостепная, степная и горно-лесная.

Для анализа и характеристики лесов использованы данные лесного фонда, лесоустroительные материалы и методы, общепринятые в лесном хозяйстве.

Результаты исследования

В лесах Российской Федерации ежегодно заготавливается свыше 200 млн. м³ древесины хозяйственно ценных древесных видов. Необходимы восстановительные мероприятия по сохранению средообразующих, водоохраных, защитных и оздоровительных функций эксплуатируемых лесных насаждений, что немаловажно для устойчивости и доходности лесного сектора экономики страны (Байтурина, 2021; Исяньюлова и др., 2019). Зарубежный опыт создания плантационных лесных культур лесообразующих древесных видов и научные исследования в этом направлении убедительно свидетельствуют в пользу внедрения их в практику лесовыращивания в России (Коновалов и др., 2023).

В федеральном проекте «Сохранение лесов» национального проекта «Экология» намечено увеличение объёмов создания искусственных насаждений основных лесообразующих древесных видов и достижение равенства в балансе выбытия и воспроизводства лесов (Коновалов и др., 2021). Проект реализуется в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства» (утверждена Постановлением Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 №318 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства») (Распоряжение Правительства РФ ..., 2018). Предусмотрен ряд мероприятий, направленных на увеличение

объемов создания искусственных насаждений до 1,5 млн га. Для обеспечения реализации федерального проекта необходимо к 2024 г. вырастить 879 млн штук посадочного материала. Этот вопрос сегодня является актуальным на фоне наблюдаемых климатических трансформаций и их последствий как для лесного хозяйства и экологического состояния среды, так и экономического сектора (Коновалов и др., 2023). Результаты десятилетнего исследования Лабораторией ООПТ и биологических ресурсов НИИ безопасности жизнедеятельности РБ удостоверяют факт сухости территорий, покрытых лесом отдельных районов с сохранением уменьшения прироста биомассы и трансформации состояния древостоев. Смена режима климата очевидна по наблюдаемому росту значений среднегодовой температуры, уменьшению осадков и ухудшению условий для развития лесных растений, в особенности южной части региона. Таким образом, наметилась тенденция обезлесения некоторых площадей и смещение южной границы территории леса на север республики. Существенными стали наблюдаемые ранние вегетационные периоды и удлинение их по продолжительности в среднем на двенадцать дней. Климатические изменения привели к просматриваемой динамике видового состава лесных насаждений (Коновалов и др., 2023). Площадь лесного фонда на территории РБ равна 5,7 млн га, лесистость – 39,9 % (для сравнения в среднем по России – 46,6 %, Приволжскому федеральному округу – 36,5 %). Ежегодный максимально допустимый объем рубки леса равен 9,6 млн м³, в том числе по хвойному хозяйству – 1,1 млн м³ (Лесной план ..., 2018).

Отметим, что в результате проведения сравнительного анализа распространения лесообразующих пород на территории РБ в условиях трансформации климата за крайние десятилетия авторами выявлено следующее:

- за период с 1998 по 2018 г. значительно выросла доля мягколиственных пород (в первую очередь *Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill.) по площади соответственно на 70,8 (39 %) и 74,2 тыс. га (32 %);

- у хвойных пород выявлена тенденция к сокращению площадей ели и пихты на 57,9 тыс. га – 15 %;

- уменьшение территорий, занимаемых дубом низкоствольным на 34 %, высокоствольным – 6 % и кленом – 8 % (Коновалов и др., 2023).

Ожидаемый прогноз по сокращению площадей хвойных и увеличению смешанных и широколиственных в составе лесных насаждений связан и с рубками, и с трансформацией климата (Байтурина, 2021).

Необходимо практиковать восстановление лесов на вырубленных участках, создание новых и охрану их от вырубок при борьбе с изменением климата. Согласно глобальной оценке лесных ресурсов, в 2020 г. 93 % – это 3,75 млрд га площади мировых лесов составляют естественно возобновляемые леса, а 7 % – 290 млн га – лесные культуры. С 1990 г. территории возобновляемых естественным путем лесов и темпы их сокращения замедлились, но в то же время площадь лесных культур увеличилась на 123 млн га (Forest, 2021; Global Forest ..., 2020). В РБ крайние десятилетия отмечается снижение темпов увеличения территории лесных культур (Коновалов и др., 2023).

По состоянию на 01.01.2013 в РБ общая площадь всех лесосеменных объектов составляла 6796,7 га, по сосне обыкновенной – 1248,3 га, в том числе: плюсовые насаждения – 772,2 га; лесосеменные плантации – 93,4 га; постоянные лесосеменные участки – 344,9 га; архивы клонов – 13,2 га; маточные плантации – 7,3 га; испытательные культуры – 3,9 га;

географические культуры – 13,4 га (Насырова, 2015). К 2030 г. в РБ планируется довести объёмы лесовыращивания до 14,7 тыс. га. По данным инвентаризации лесных питомников на 01.01.2020 на территории региона выращено 53,4 млн шт. посадочного материала с открытой корневой системой. Ежегодная потребность в посадочном материале составляет более 30 тыс. штук. По состоянию на 01.07.2020 к весенним лесопосадочным работам было заготовлено 1,709 т семян, из них по сосне обыкновенной – 1,15 т. На имеющихся в республике лесосеменных объектах заготовлено всего 100 кг семян улучшенной селекционной категории, что составляет 5,8 % от всего объёма заготовленных. Посев семенного материала нормальной селекционной категории в питомниках республики проведён на площади 30 га, при этом доля улучшенной селекционной категории не превысила 4 %. На протяжении ряда последних лет в регионе не создано ни одного лесосеменного объекта, что сдерживает объёмы заготовки улучшенных семян. Не проводится генетическая паспортизация имеющихся лесосеменных плантаций с привлечением методов анализа ДНК, что не позволяет дать объективную оценку их эффективности и соответствия требованиям действующих стандартов. В наших исследованиях на данный факт обращено важное внимание (Коновалов и др., 2023).

Основной целью проекта «Экология» является наращивание площадей создания плантационных насаждений улучшенным посадочным материалом. Объёмы ежегодно создаваемых лесных культур в РБ составляют 7,4 тыс. га. Назрела необходимость формирования лесного комплекса по производству деловой древесины в промышленных масштабах на плантациях с наибольшей продуктивностью и укороченным оборотом рубок. Все большая заинтересованность наблюдается в создании плантационных лесных культур как во всем мире, так и на территории России (Байтурина, 2021). В нашей стране сосредоточены около 1/4 запасов древесины мира – это 82 млрд м³ из них 80 % хвойные, причем за последние десятилетия создано около 40 тыс. га плантационных лесных культур хвойных видов. Сегодня лесные плантации, сосредоточенные на 7 % от общей лесной территории планеты, обеспечивают 35 % объемами заготавливаемой древесины в год (Коновалов и др., 2021). Считается, что лесные плантации способны обеспечить в настоящее время 44 % использования древесины во всем мире (Global Forest ..., 2020). Намерение увеличить территории лесных насаждений высказали 80 государств, среди них Китай, Канада, США, Индия и другие, где плантационное хозяйство ведется уже несколько десятилетий. Делается упор на формирование плантаций преимущественно семенным путем из быстрорастущих, высокопродуктивных и востребованных древесных видов с целью получения увеличенного прироста древесины. Применение различных лесокультурных, лесоводственных и лесомелиоративных мероприятий на плантациях позволяет получить коммерческие лесоматериалы в промышленных масштабах (Штукин, 2019; Global Forest ..., 2020). Тем самым решается и вопрос восполнения лесных территорий для эксплуатационных целей. Для естественных насаждений, особенно в защитных лесах, основной ролью становится сохранение и приумножение экологического потенциала (Байтурина, 2021). Анализ зарубежных источников выявил, что лесные посадки подразумевают лесные культуры, а Food and Agriculture Organization использует термин «seminatural forests» как леса полуестественные (Global Forest ..., 2020). Следует понимать, что это говорится об искусственных посадках, где имитируют леса по основным таксационным характеристикам естественного происхождения.

Эксперты считают, что вероятность заготовки леса увеличится на плантациях к 2050 г. в три раза с возрастанием их площади до 60 %. В настоящее время в РБ функционирует недостаточно эффективная система лесного семеноводства, позволяющая обеспечить мероприятия по лесовосстановлению и лесоразведению высококачественным посадочным материалом (Коновалов и др., 2021). Представляет интерес, выделенный на площади 4577,8 га генетический резерват *Larix sukaczewii* (75,3 % от общей площади объектов ЕГСК). При этом плюсовые насаждения занимают 939,3 га (15,5 %), лесосеменные участки (ПЛСУ) – 384,8 га (6,3 %). Лесосеменные плантации и другие объекты расположены на незначительных площадях, доля которых варьирует от 0,1 % до 1,8 % (Байтурина, 2021). Для выращивания посадочного материала в республике имеется 105 лесных питомников общей площадью 790 га, с наличием более 70 млн шт., из них 90 % хвойных видов (Коновалов, 2023).

Выводы

Таким образом, резюмируя вышесказанное, авторы отмечают, что назрела необходимость:

- развития проектов в лесоклиматических и технологических углеродных единицах;
- дополнения Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации статьей о климатических инициативах;
- сокращения выбросов CO₂ за счёт наилучших доступных технологий и/или механизмов компенсации.

При этом важно, чтобы российские климатические проекты соответствовали международно признанным стандартам.

Реализация лесных климатических проектов позволяет повысить продуктивность лесных экосистем как за счет эффективного лесовосстановления, так и путем плантационного лесоразведения, в том числе на заброшенных сельскохозяйственных землях, что в целом способствует достижению целей Парижского соглашения. Опубликованные результаты исследования выявили значительный потенциал использования клонов быстрорастущих древесных растений для лесоклиматических проектов. Необходимость продолжения долгосрочных экспериментов по анализу влияния проводимых лесоводственных мероприятий на изменения запасов углерода в разных почвенно-климатических условиях сохраняется.

Исследование выполнено в рамках программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «ПРИОРИТЕТ 2030» (Национальный проект «Наука и университет»)

Библиографический список

1. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / под ред. Н. В. Лукиной. М.: Тов-во научн. изданий КМК, 2018. 232 с.
2. Байтурина Р.Р. Лесовосстановление на территории Республики Башкортостан в условиях изменения климата // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2021. № 4 (65). С. 116-122.
3. В реестре углеродных единиц зарегистрировали первый лесоклиматический проект. Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/18687409>. (дата обращения 20.09.2023).
4. Всемирная метеорологическая организация – авторитетный источник информации в системе Организации Объединенных Наций по вопросам погоды, климата и воды. Режим доступа: Изменение климата подрывает почти все цели в области устойчивого развития | Всемирная Метеорологическая Организация (wmo.int). (дата обращения 10.10.2023).
5. Исяньюлова Р.Р., Ишбирдина Л.М., Габделхаков А.К. Динамика таксономического состава и спектра жизненных форм флоры лесопарка им. Лесоводов Башкортостана в условиях изменения климата // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: международный сборник научных статей / Отв. ред. Э.А. Курбанов. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. С. 54-62.

6. Коновалов В.Ф., Байтурина Р.Р., Рафикова Д.А. Селекционно-генетические аспекты плантационного лесовыращивания *Pinus sylvestris* в Республике Башкортостан // Российский электронный научный журнал. 2023. № 1 (47). С. 60-72.
7. Коновалов В.Ф., Байтурина Р.Р., Ханова Э.Р., Рафикова Д.А. Перспективы искусственного восстановления сосновых лесов в Республике Башкортостан // Российский электронный научный журнал. 2021. № 4 (42). С. 32-44.
8. 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.
9. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Устюгова Л.С., Губаев А.В., Лежнин С.А., Незамаев С.А. Пространственная динамика фитомассы березняков на бывших сельскохозяйственных землях Марийского Заволжья // Лесной журнал. 2010. № 3. С. 8-14.
10. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Мошкина Л.С., Губаев А.В., Лежнин С.А., Незамаев С.А. К вопросу об углерододепонирующих насаждениях // Вестник МарГТУ. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. 2008. № 3. С. 5-17.
11. Лесной план Республики Башкортостан. Утвержден Указом временно исполняющего обязанности Главы Республики Башкортостан от 27 декабря 2018 года № УГ-340.
12. Лукина Н. В. Гераскина 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.
13. Меры по борьбе с изменением климата. Режим доступа: <https://www.un.org/ru/climatechange>. (дата обращения 20.09.2023).
14. Мякотникова Е. Индустрия и природа. Углеродная единица санкциями не облагается // Аргументы и факты. – Режим доступа: https://aif.ru/society/ecology/industriya_i_priroda_uglerodnaya_edinica_sanksiyami_ne_oblagaetsya. (дата обращения 20.09.2023).
15. Насырова Э.Р. Оценка роста и урожайности сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на лесосеменных объектах в Республике Башкортостан // Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук / Поволж. гос. технол. ун-т. Йошкар-Ола, 2015.
16. Парижское соглашение. 2015. URL: <https://golnk.ru/oMxvm>. (дата обращения 08.02.2022).
17. 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.
18. О Стратегии развития лесного комплекса РФ до 2030 г.: Распоряжение Правительства РФ от 20 сентября 2018 г. № 1989-р
19. Резолюция по итогам научных дебатов «Лесные климатические проекты в России», 19.10.2021. Москва: ЦЭПЛ РАН. URL: <https://goo.su/ITAB>. (дата обращения 08.02.2022).
20. Тебенькова Д.Н., Гичан Д.В., Гагарин Ю.Н. Влияние лесоводственных мероприятий на почвенный углерод: обзор // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5, № 4. Ст. № 116
21. Углеродный след в России и мире в 2023 году / Проект kp.ru – Режим доступа: <https://www.kp.ru/family/ecology/uglerodnyj-sled/>. (дата обращения 20.09.2023).
22. Формы отчета ведения государственного лесного реестра по состоянию на 01.01.2019 г. / Министерство лесного хозяйства Республики Башкортостан. – Режим доступа: <https://forest.bashkortostan.ru/documents/>. (дата обращения 20.04.2023).
23. 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.
24. Штукин С.С. О создании лесных углерододепонирующих плантаций // Труды БГТУ. 2019. №1. С. 67-71
25. Aragón S., Salinas N., Nina-Quispe A., Qquellon V.H., Paucar G.R., Huaman W., Porroa P.C., Olarte J.C., Cruz R., Muñiz J.G. et al. Aboveground Biomass in Secondary Montane Forests in Peru: Slow Carbon Recovery in Agroforestry Legacies // Glob. Ecol. Conserv. 2021, 28, e01696.
26. Bastin J.-F., Finegold Y., Garcia C., Mollicone D., Rezende M., Routh D., Zohner C.M., Crowther T.W. The Global Tree Restoration Potential // Science. 2019. 365. 76-79.
27. Boča A., Van Mieghroet 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. P. 35-47.
28. 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.
29. Cotrufo M. F., Wallenstein M. D., Boot C. M., Denef 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.

30. Cuesta F., Calderón-Loor M., Rosero P., Miron N., Sharf A., Proaño-Castro C., Andrade F. Mapping Above-Ground Carbon Stocks at the Landscape Scale to Support a Carbon Compensation Mechanism: The Chocó Andino Case Study // *Forests*. 2023, 14, 1903. [https:// doi.org/10.3390/f14091903](https://doi.org/10.3390/f14091903).
31. 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.
32. Forest. Higher temperatures – smaller trees? URL: <https://www.upm.com/articles>. (дата обращения 15.06.2021).
33. 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.
34. 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.
35. Global Forest Resources Assessments. FRA 2020 Results. Access mode: <http://www.fao.org/3/ca8753ru/CA8753RU.pdf>. (дата обращения 01.07.2023).
36. Goetz S.J., Hansen M., Houghton R.A., Walker W., Laporte N., Busch J. Measurement and Monitoring Needs, Capabilities and Potential for Addressing Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation under REDD+ // *Environ. Res. Lett.* 2015. 10. 123001.
37. 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.
38. 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.
39. 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. P. 439-453.
40. Lemus R., Lal R. Bioenergy crops and carbon sequestration // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2005. Vol. 24. No. 1. P. 1-21.
41. Li Y., Bruehlheide 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.
42. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Adams H., Adler C., Aldunce P., Ali E., Begum R.A., Betts R., Kerr R.B., Biesbroek R. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability; IPCC Sixth Assessment Report; IPCC: Geneva, Switzerland, 2022.
43. 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.
44. Roe S., Streck C., Obersteiner M., Frank S., Griscom B., Drouet L., Fricko O., Gusti M., Harris N., Hasegawa T. et al. Contribution of the Land Sector to a 1.5 °C world // *Nat. Clim. Chang.* 2019, 9, 817-828.
45. Rytter R. M. The potential of willow and poplar plantations as carbon sinks in Sweden // *Biomass and Bioenergy*. 2012. Vol. 36. P. 86-95.
46. 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.
47. 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.

References

1. Akkumulyaciya ugleroda v lesnyh pochvah i sukcesionnyj status lesov (Carbon accumulation in forest soils and successional status of forests). Pod red. N. V. Lukinoj. M.: *Tov-vo nauchn. izdanij KMK*. 2018. 232 p.
2. Bajturina R.R. Lesovosstanovlenie na territorii Respubliki Bashkortostan v usloviyah izmeneniya klimata (Reforestation on the territory of the Republic of Bashkortostan in the context of climate change). *Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii im. V.R. Filippova*. 2021. № 4 (65). P. 116-122.
3. V reestre uglerodnyh edinic zaregistrovali pervyj lesoklimaticheskij proekt (The first forest climate project was registered in the register of carbon units). Available at: <https://tass.ru/ekonomika/18687409>, 20.09.2023.
4. Vsemirnaya meteorologicheskaya organizaciya avtoritetnyj istochnik informacii v sisteme Organizacii Obedinennyh Nacij po voprosam pogody, klimata i vody (The World Meteorological Organization is the authoritative source of information within the United Nations system on weather, climate and water issues.). *Izmenenie klimata podryvaet pochti vse celi v oblasti ustojchivogo razvitiya, Vsemirnaya Meteorologicheskaya Organizaciya* (wmo.int), 10.10. 2023.
5. Isyanyulova R.R., Ishbirdina L.M., Gabdelhakov A.K. Dinamika taksonomicheskogo sostava i spektra zhiznennyh form flory lesoparka im. Lesovodov Bashkortostana v usloviyah izmeneniya klimata (Dynamics of the taxonomic composition and spectrum of life forms of the flora of the forest park named after. Foresters of Bashkortostan in the context of climate change). *Lesnye ekosistemy v usloviyah izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distancionnyj monitoring*. Joshkar-Ola, 2019. P. 54-62.

6. Konovalov V.F., Bajturina R.R., Rafikova D.A. Selekcionno-geneticheskie aspekty plantacionnogo lesovyvrashchivaniya *Pinus sylvestris* v Respublike Bashkortostan (Selection and genetic aspects of plantation forest growing of *Pinus sylvestris* in the Republic of Bashkortostan). *Rossijskij elektronnyj nauchnyj zhurnal*. 2023. No 1 (47). P. 60-72.
7. Konovalov V.F., Baiturina R.R., Hanova E.R., Rafikova D.A. Perspektivy iskusstvennogo vosstanovleniya sosnovykh lesov v Respublike Bashkortostan (Prospects for artificial restoration of pine forests in the Republic of Bashkortostan). *Rossijskij elektronnyj nauchnyj zhurnal*. 2021. No 4 (42). P. 32-44.
8. Kuznecova A. I., Lukina N. V., Gornov A. V., Gornova M. V., Tihonova E. V., Smirnov V. E., Danilova M. A., Teben'kova D. N., Braslavskaya T. Yu., Kuznecov V. A., Tkachenko Yu. N., Genikova N. V. Zapasy ugleroda v peschanykh pochvakh sosnovykh lesov na zapade Rossii (Carbon reserves in sandy soils of pine forests in western Russia). *Pochvovedenie*. 2020. No 8. P. 959-969.
9. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Ustyugova L.S., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Nezamaev S.A. Prostranstvennaya dinamika fitomassy bereznyakov na byvshikh sel'skokhozyaistvennykh zemlyakh Mariiskogo Zavolzh'ya (Spatial dynamics of phytomass of birch forests on former agricultural lands of the Mari Trans-Volga region). *Lesnoi zhurnal*. 2010. No. 3. Pp. 8-14.
10. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Moshkina L.S., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Nezamaev S.A. K voprosu ob uglerodeponiruyushchikh nasazhdeniyakh (On the issue of carbon sequestration plantings). *Vestnik MarGTU. Ioshkar-Ola: Mariiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet*. 2008. No. 3. Pp. 5-17.
11. Lesnoj plan Respubliki Bashkortostan (Forest plan of the Republic of Bashkortostan). From 27.12.2018 № UG-340.
12. Lukina N. V. Geras'kina A. P., Kuznecova A. I., Smirnov V. E., Gornov A. V., Shevchenko N. E., Tihonova E. V., Teben'kova D. N., Basova E. V. Funkcional'naya klassifikaciya lesov: aktual'nost' i podhody k razrabotke (Functional classification of forests: relevance and approaches to development). *Lesovedenie*. 2021. No 6. P. 566-580.
13. Mery po bor'be s izmeneniyem klimata (Actions to combat climate change). Available at: <https://www.un.org/ru/climatechange>, 20.09.2023.
14. Myakotnikova E. Industriya i priroda. Uglernodnaya edinica sankciyami ne oblagatsya (Industry and nature. The carbon unit is not subject to sanctions). Available at: https://aif.ru/society/ecology/industriya_i_priroda_uglernodnaya edinica_sankciyami_ne_oblagatsya, 20.09.2023.
15. Nasyrova E.R. Ocenka rosta i urozhajnosti sosny obyknovnoy (*Pinus sylvestris* L.) na lesosemyennykh obektakh v Respublike Bashkortostan (Assessment of growth and productivity of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) at forest seed sites in the Republic of Bashkortostan). Povolzh. gos. tekhnol. un-t. Ioshkar-Ola, 2015.
16. Parizhskoe soglasenie (Paris Agreement). 2015. URL: <https://goln.ru/oMxvm>, 08.02.2022.
17. Pripitina I. V., Frolova G. G., Shanin V. N. Vybór optimal'nykh skhem posadki lesnykh kul'tur: komp'yuternyy eksperiment (Selection of optimal forest planting schemes: computer experiment). *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye*. 2016. Vol. 8. No 2. P. 333-343.
18. O Strategii razvitiya lesnogo kompleksa RF do 2030 g (About the Strategy for the development of the forestry complex of the Russian Federation until 2030). Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 20 sentyabrya 2018 g. № 1989-r
19. Rezolyuciya po itogam nauchnykh debatov «Lesnye klimaticheskie proekty v Rossii» (Resolution based on the results of the scientific debate “Forest climate projects in Russia”), 19.10.2021 g., Moscow, CEPL RAN. URL: <https://goo.su/ITAB>, 08.02.2022
20. Teben'kova D.N., Gichan D.V., Gagarin Yu.N. Vliyanie lesovodstvennykh meropriyatij na pochvennyj uglerod: obzor (Impact of silvicultural activities on soil carbon: a review). *Voprosy lesnoj nauki*. 2022. Vol. 5. No 4. St. № 116
21. Uglernodnyj sled v Rossii i mire v 2023 godu (Carbon footprint in Russia and the world in 2023). Available at: <https://www.kp.ru/family/ecology/uglernodnyj-sled>, 20.09.2023.
22. Formy otcheta vedeniya gosudarstvennogo lesnogo reestra po sostoyaniyu na 01.01.2019 g. (Report forms for maintaining the state forest register as of 01/01/2019). Ministerstvo lesnogo hozyajstva Respubliki Bashkortostan Available at: <https://forest.bashkortostan.ru/documents>, 20.04.2023.
23. Shanin V. N., Frolov P. V., Korotkov V. N. Vsegda li iskusstvennoe lesovosstanovlenie mozhet byt' lesoklimaticheskim proektom (Can artificial reforestation always be a forest-climate project?). *Voprosy lesnoj nauki*. 2022. Vol. 5. No 2. P. 103-139.
24. Shtukin S.S. O sozdaniy lesnykh uglernodeponiruyushchih plantacij (On the creation of forest carbon sequestration plantations). *Trudy BGTU*. 2019. No 1. P. 67-71.
25. Aragón S., Salinas N., Nina-Quipe A., Qquellon V.H., Paucar G.R., Huaman W., Porroa P.C., Olarte J.C., Cruz R., Muñiz J.G. et al. Aboveground Biomass in Secondary Montane Forests in Peru: Slow Carbon Recovery in Agroforestry Legacies. *Glob. Ecol. Conserv.* 2021, 28, e01696.
26. Bastin J.-F., Finegold Y., Garcia C., Mollicone D., Rezende M., Routh D., Zohner C.M., Crowther T.W. The Global Tree Restoration Potential. *Science*. 2019. 365. P. 76-79.

27. 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. P. 35-47.
28. 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.
29. 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.
30. Cuesta F., Calderón-Loor M., Rosero P., Miron N., Sharf A., Proaño-Castro C., Andrade F. Mapping Above-Ground Carbon Stocks at the Landscape Scale to Support a Carbon Compensation Mechanism: The Chocó Andino Case Study. *Forests*. 2023. 14. 1903. <https://doi.org/10.3390/f14091903>
31. 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.
32. Forest. Higher temperatures – smaller trees? Available at: URL: <https://www.upm.com/articles>, 15.06.2021.
33. 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.
34. 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.
35. Global Forest Resources Assessments. FRA 2020 Results. Access mode: <http://www.fao.org/3/ca8753ru/CA8753RU.pdf>, 01.07.2023
36. Goetz S.J., Hansen M., Houghton R.A., Walker W., Laporte N., Busch J. Measurement and Monitoring Needs, Capabilities and Potential for Addressing Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation under REDD+. *Environ. Res. Lett.* 2015. 10. 123001.
37. 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.
38. 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.
39. Laganieri 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.
40. Lemus R., Lal R. Bioenergy crops and carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2005. Vol. 24. No. 1. P. 1-21.
41. 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.
42. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Adams H., Adler C., Aldunce P., Ali E., Begum R.A., Betts R., Kerr R.B., Biesbroek R. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability; IPCC Sixth Assessment Report; IPCC: Geneva, Switzerland, 2022.
43. 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.
44. Roe S., Streck C., Obersteiner M., Frank S., Griscom B., Drouet L., Fricko O., Gusti M., Harris N., Hasegawa T. et al. Contribution of the Land Sector to a 1.5 °C world. *Nat. Clim. Chang.* 2019. 9. 817-828.
45. Rytter R. M. The potential of willow and poplar plantations as carbon sinks in Sweden. *Biomass and Bioenergy*. 2012. Vol. 36. P. 86-95.
46. 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.
47. 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.