

УДК 630.182.59

***ОЦЕНКА УГЛЕРОДНЫХ ПУЛОВ ЛЕСНЫХ И ПОСТАГРАРНЫХ
ЗЕМЕЛЬ В СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ***

Данилюк Д.Я.

магистрант,

Сибирский государственный университет науки и технологии им. академика

М.Ф. Решетнева,

Красноярск, Россия.

Вайс А.А.

профессор, доктор сельскохозяйственных наук, доцент,

Сибирский государственный университет науки и технологии им. академика

М.Ф. Решетнева,

Красноярск, Россия.

Аннотация Данная статья представляет собой обзор и исследовательские результаты, связанные с ролью лесных и сельскохозяйственных экосистем в секвестрации углерода, влиянии землепользования на почвенные процессы и биоразнообразие, а также методы оценки и управления запасами органического вещества в почвах. Исследования подтверждают важность лесных насаждений, агролесоводства и правильного землепользования для повышения запасов органического углерода в почвах, сохранения биоразнообразия и борьбы с эрозией.

Ключевые слова: лес, молодняки, углерод, почвенный углерод, органический углерод, постаграрные земли, дистанционное зондирование.

***ASSESSMENT OF CARBON POOLS IN FOREST AND POST-
AGRICULTURAL LANDS IN CONTEMPORARY RESEARCH***

Danyliuk D.Ya.

Master's Student,

Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F.

Reshetnev,

Krasnoyarsk, Russia

Vais A.A.

Professor, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor

Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F.

Reshetnev,

Krasnoyarsk, Russia

Abstract This article presents an overview and research findings related to the role of forest and agricultural ecosystems in carbon sequestration, the impact of land use on soil processes and biodiversity, as well as methods for assessing and managing soil organic matter stocks. The studies confirm the importance of forest plantations, agroforestry, and proper land management practices for increasing soil organic carbon reserves, conserving biodiversity, and combating erosion.

Keywords: forest, young stands, carbon, soil carbon, organic carbon, post-agricultural lands, remote sensing.

Введение. Леса играют ключевую роль в глобальном углеродном цикле, а лесовосстановление является важным механизмом смягчения последствий изменения климата. Планирование вырубки лесов влияет на углеродный цикл из-за функций поглощения углерода лесами. Li Y и др. [11] предлагают модель планирования для определения возраста рубки, восстановления лесов для оптимизации поглощения углерода и улучшения экономических и экологических выгод основанную на потреблении леса с течением времени.

Модель может послужить полезным руководством по разработке устойчивых сроков заготовки леса.

Состав формирующихся молодняков зависит от таких факторов, как тип почвы, таксационных характеристик, лосорастительной подзоны, площади участков и других не менее важных показателей [28].

На постагрогенных землях, в исследовании Н.В. Беляевой [27], выявлено успешное естественное возобновление главных лесообразующих пород. Количество подроста сосны и ели, их возраст и средняя высота на этих землях всегда превышают необходимые показатели для перевода естественных или искусственных насаждений. На плодородных залежных землях формируется молодое поколение будущего смешанного древостоя с преобладанием сосны или ели после луговой стадии рудеральной растительности.

Исследование по формированию лесов на постантропогенных землях проводили О.Ф. Герасимова и др. [29]. На участках оценена биомасса древостоя и подстилки, а также вычислен объем углерода, депонированного в них. Отсутствие оптимальных условий разложения хвойного опада замедляет процесс ферментации и при отсутствии пожаров способствует образованию молодой подстилки. Почвенные условия, процессы минерализации и ландшафтные особенности позволяют формировать высокогустотные сосновые насаждения в однородных условиях местопроизрастания, способных депонировать значительное количество углерода.

Выбросы парниковых газов способствуют изменению климата, при этом плантации снижают CO_2 в атмосфере. Авторы в исследовании оценивали ассимиляцию углерода и влияние факторов окружающей среды на фотосинтез *Zelkova serrata*. Деревья демонстрировали низкую скорость фотосинтеза и ассимиляцию углерода после посадки в тропическом муссонном климате. Влияние высокой температуры и дефицит давления пара, может усугубиться в будущем. Площадь листьев указывает на сезонные колебания, а сильная дефолиация произошла из-за тайфуна летом. Результаты показали, что дефицит

давления пара и температура значительно влияли на газообмен, особенно в засушливый сезон, что приводило к снижению скорости фотосинтеза и ассимиляции углерода. Годовая ассимиляция углерода составила 3,50 Мг С/га/год в исследуемом районе [4].

Оценка запасов углерода на пастбищах и лесных участках в процессе естественного возобновления, а также прогноз накопления углерода в зависимости от различных систем землепользования с использованием алгоритма *Random Forest* проводилась Marçal M. F. M., и другими [12]. Рассматривались четыре системы: (i) агролесоводство для животноводства, (ii) агролесоводство для фруктов, (iii) традиционное пастбище и (iv) фрагмент леса. Анализ показал, что агролесоводческие системы для плодоводства и животноводства более эффективно накапливают углерод в почве по сравнению с пастбищами и участками леса, находящимися в естественном возобновлении. Запасы азота и типы землепользования оказались ключевыми переменными для оценки накопления углерода на основе физических и химических характеристик почвы.

Zhang L. с другими авторами [26] разработали модели роста накопления углерода с учетом климатических условий с переменными параметрами для трех основных хвойных насаждений (*Larix spp.*, *Pinus massoniana* и *Pinus tabulaeformis*) с использованием взвешенных методов нелинейной регрессии. Средняя ошибка прогнозирования (MPE) составила менее 5%, а общая относительная ошибка (T P E) составила менее 2%. Результаты показывают, что: способность поглощения углерода от самой высокой до самой низкой в лесах *P. massoniana*, *Larix* и *P. tabulaeformis*. МАТ и слияния и поглощения по-разному влияют на процесс роста углерода и способность этих плантаций депонировать углерод. Наибольшее влияние на способность поглощения углерода обнаружено на плантации *Larix*.

Kizeková M. [10] проводила мониторинг производства биомассы и запасов углерода в надземной и подземной биомассе на пяти типах пастбищ.

Средние значения биомассы за два сезона значительно различались в зависимости от педоклиматических условий и ботанического состава. Наибольшее количество видов растений было зафиксировано на низменных сенокосных лугах. Результаты показали, что полуестественные и улучшенные пастбища являются важными поглотителями углерода и могут сыграть ключевую роль в смягчении последствий глобального изменения климата.

В исследовании Belay В. [3] авторы применяли биогеохимическое механистическое моделирование экосистем для прогнозирования количества углерода, поглощающегося в разное количество времени с целью определения оптимальных районов для лесовосстановления. Вводя систему «Нормального леса», обеспечили долгосрочный эффект секвестрации лесных массивов. Сделан вывод, что 3,4 млн га земли могут рассматриваться как экологически потенциально пригодные для лесовосстановления. Предполагая изначально 100-летний период ротации при этом общий чистый потенциал поглощения углерода составляет 177 Тг С [3].

Лесные почвы умеренного пояса Европы являются важными поглотителями углерода, способными абсорбировать CO₂ из атмосферы. В период с 2012 по 2016 годы Wiatrowska К. [22] и другие авторы изучали сезонные колебания содержания органического углерода (ОУ) и активности дегидрогеназ (ДГГ). Результаты показали статистически значимую сезонную изменчивость содержания ОУ, с наибольшими значениями весной и осенью, а наименьшими — летом. В органогенном горизонте (гор. О) сезонных изменений содержания ОУ не наблюдалось. Статистический анализ показал, что содержание ОУ зависит от возраста лесонасаждений и прогрессирующего закисления почв. Кроме того, содержание ОУ в горизонте О отрицательно коррелировало с влажностью почвы и активностью ДГГ, где высокая микробная активность снижает накопление углерода. А эрозия почвы может привести к потере почвенного органического углерода (SOC), особенно на наклонных сельскохозяйственных участках. Использование фитомелиорации, в

частности многолетней лесной растительности, признано эффективной мерой для защиты от эрозии и смягчения последствий изменения климата через секвестрацию углерода. Исследование Wiśniewski P. [23] показало, что лесное хозяйство значительно повышает содержание органического вещества в почве и запасы почвенного органического углерода (ПОУ). Результаты указывают на то, что землепользование и уклоны являются ключевыми факторами, влияющими на запасы SOC в верхнем слое почвы в молодых ледниковых районах.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) рекомендовала облесение маргинальных земель в качестве средства повышения способности почвы выполнять роль поглотителя углерода (C). Одна из сельскохозяйственных почв была засеяна травой и кукурузой в системе севооборота, а другая попеременно засевалась кукурузой (6 месяцев) и оставалась под паром (6 месяцев). Облесение по-разному влияло на различные запасы углерода. Увеличение запасов углерода, произошедшее в результате облесения, было ниже на участках, на которых применялся кукурузно-травяной севооборот, по сравнению с участками с кукурузно-паровым севооборотом [8].

Оценкой влияния землепользования на филогенетическое и таксономическое разнообразие Odonata в Амазонке, занимался Geraldo de Carvalho F., и другие [9], выдвинув гипотезу, что в обезлесенных районах сообщество будет менее разнообразным. Предположили, что изменения среды приводят к исчезновению специализированных лесных видов и распространению видов открытых территорий. В результате, антропогенное воздействие негативно сказалось на филогенетическом разнообразии стрекоз, тогда как увеличение кустарниковой растительности связано с его ростом. Однако кустарники указывают на нарушенные участки с преобладанием вторичной растительности и меньшим пологом из-за отсутствия естественного древесного покрова.

Yasin G. и другие авторы оценивали текущее состояние хранения углерода и будущий потенциал агролесоводства в Пакистане. Почвенный углерод измеряли на глубине 0-30 см с использованием метода Уолкли-Блэка на некоторых участках. В исследуемой области количество деревьев на фермах варьировало от 18 до 51 дерева/га, и его можно увеличить до 42-83 деревьев/га при максимальной посадке. Общий запас углерода в деревьях колебался от 0,0003 до 8,79 мг/га, со средним значением 0,39 мг/га. Эти результаты подчеркивают текущий и потенциальный вклад агролесоводства и могут быть использованы для разработки стратегий посадки деревьев на сельскохозяйственных землях [25]. Почвенный органический углерод и азот делятся на лабильные и непокорные пулы в зависимости от времени их цикла, а их циркуляция зависит от качества почвы. В данной статье Ferraz de Almeida R. [7] проверялась гипотеза о различиях этих пулов в сельскохозяйственных почвах с разными системами управления удобрениями в тропиках. Целью исследования являлось изучение влияния накопления углерода и азота на биологическое состояние почвы. Результаты показали, что пулы углерода варьируют по слоям почвы и типам использования. Произрастание лесов в камбизоле и латозоле способствовало увеличению лабильных и непокорных пулов углерода и азота благодаря большей экологической стабильности. В то же время, при эффективном управлении удобрениями на обогащенных участках сельскохозяйственных почв, могут наблюдаться аналогичные пулы углерода и азота, как и на лесных почвах.

Varnagiryte-Kabašinskienė I. [20] изучены *Arenosols* с низким и *Luvisols* с высоким содержанием питательных веществ после облесения хвойными и лиственными породами. Анализировались изменения запасов ПОУ в течение 30 лет после облесения. В облесенных *Arenosols* средняя масса и запасы ПОУ лесной подстилки увеличились больше, чем в *Luvisols*. Через 2–3 десятилетия в хвойных насаждениях масса подстилки почти вдвое больше, чем в лиственных насаждениях. У облесенных *Luvisols* наблюдалось снижение средней объемной

плотности с возрастом древостоя, с наименьшими значениями в 21–30-летних насаждениях. Концентрации углерода в верхнем слое почвы (0–30 см), особенно в *Luvisols*, увеличивались с возрастом насаждений. Запасы ПОУ в лесной подстилке были выше, чем у *Luvisols*, но доля запасов ПОУ в верхнем слое почвы была сопоставима с пастбищами. Эти данные поддерживают идею облесения бывших сельскохозяйственных угодий при текущих климатических и почвенных условиях, однако преобразование многолетних пастбищ в лесные угодья следует проводить осторожно [20]. Связывание углерода в почве важно для смягчения антропогенного увеличения углекислого газа в атмосфере. Пастбища и луга способствуют накоплению органического углерода (SOC). Целью исследования Novák J. было сравнение влияния видов растений и их качества на отложение SOC в 18 вариантах лугов и пастбищ. Изучали отложения SOC и NT (обработка без вспашки) в почве. Старое полуестественное пастбище показало наибольшее накопление SOC. Анализ RDA (это статистический метод, используемый для изучения взаимосвязи между множеством экологических факторов и структурой микробиоты почвы) указывал, что количество видов растений влияет на общую видовую изменчивость на 17%. В целом, экологически восстановленные луга с дополнительным посевом автохтонных видов обеспечивают более высокое содержание SOC для сельского хозяйства [14].

Понимание влияния стехиометрии почвы и усвоения питательных веществ на выбросы CO₂ из почвы важно для прогнозирования потребностей лесной экосистемы в питательных веществах и ограничений для роста леса. Авторами Tian X., Ge X., Zhou B., Li M. было изучено, как надземная и подземная стехиометрия влияют на выбросы CO₂ и дыхание почвы на плантациях субтропического бамбука (*Phyllostachys edulis*). Результаты показали, что скорость дыхания почвы не различалась между четырьмя бамбуковыми насаждениями. Концентрации азота (N) и фосфора (P) выше в листьях бамбука, чем в подстилке. Стехиометрия подстилки оказалась лучшим

индикатором дыхания почвы по сравнению с надземной стехиометрией, это подтверждает, что подстилка и стехиометрия почвы являются надежными показателями скорости дыхания почвы [18].

Актуальные и потенциальные запасы углерода в фитомассе и 100-см слое почвы рассчитаны на единой картографической основе, учитывающей типовозрастную структуру растительности, таксономию почв, их гранулометрический состав и использование земель. За период антропогенного воздействия общие запасы органического углерода снизились почти на 25 % в Костромской области и более чем на 30 % в Курской. В Костромской области углеродный пул фитомассы уменьшился на 40 % из-за активного использования лесов, тогда как пул углерода в почве остался практически неизменным. В Курской области высокая степень распашки и почти полное уничтожение древесной растительности привели к значительному снижению углеродных пулов как фитомассы (на 75 %), так и почвы (на 23-27 %) [30].

Waymouth V. и др. [21] исследовали три типа землепользования, анализировали три слоя растительности и использовали пробы почвы для оценки физико-химических свойств. Таксономический и функциональный состав почвенных бактериальных сообществ оценивался с помощью последовательностей генов 16S рРНК. Бактериальный состав в остаточных лесах и восстановленных почвах отличался от пастбищной почвы. Метаболическая активность бактерий, а также содержание углерода и азота уменьшались с глубиной, в то время как разнообразие и равномерность бактериального метаболизма возрастали. Таксономический состав связан с механическим составом и плодородием почвы, а функциональный — только с механическим составом. Результаты показывают, что преобразование лесов в пастбища вызывает значительные изменения в бактериальном сообществе, а восстановление растительности может помочь вернуть эти изменения.

В исследовании Truax B. [19] анализировалось влияние плотности посадки и участка на продуктивность гибридного тополя (*Populus canadensis* ×

P. taximowiczii) в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Использовались шесть плотностей посадки. Плотность значительно влияла на размеры ствола, но незначительно — на объем древостоя, биомассу и углеродные запасы. На плодородных участках отмечена сильная связь между площадью дерева и распределением биомассы, углерода в почве и поступлением питательных веществ. Более высокая конкуренция за ресурсы при увеличении плотности снижала доступность макроэлементов (кроме калия), что способствовало накоплению углерода в почве. В долгосрочной перспективе более плотные посадки могли бы увеличить углеродные запасы под землей [19]. Посадка деревьев на заброшенных сельскохозяйственных угодьях может восстановить качество почвы и повысить продуктивность древесных пород также по мнению Danise T. [5]. На таких землях созданы системы совмещения деревьев, включая *Populus alba* и *Juglans regia*. Исследование показало, что органическое вещество почвы, активность ферментов и состав нематод различались между системами совмещения и обычными полями. Плантация деревьев увеличила содержание углерода и азота в почве, а также активность ферментов. Нематоды имели неоднородный состав, при этом хищники отсутствовали в сельскохозяйственной почве. Многофакторный анализ показал, что виды, фиксирующие азот, важны для улучшения качества почвы; *A. cordata* связано с лучшим качеством почвы, а *E. umbellata* — с ростом ценных древесных пород. Таким образом, совмещение видов деревьев способствует восстановлению плодородия и улучшению качества почвы [5].

Агролесоводство является важным вариантом восстановления деградированных земель и эффективным способом восстановления деградированных земель и экосистемных функций. В этом исследовании Siarudin M. [17] выявил в пяти районах Западной провинции, шесть агролесомелиоративных систем с различными запасами углерода. Участки смешанных деревьев продемонстрировали максимальный запас углерода — 108,9 Мг/га. Накопление углерода варьировало в зависимости от плотности и

разнообразия видов. Фермеры отметили, что эти системы также предотвращают эрозию почвы и способствуют восстановлению деградированных земель. Для повышения принятия агролесоводства фермерами необходимо внедрение поддерживающей политики и научно обоснованных мер.

Mechergui K. [13] в своем исследовании оценивал биомассу и углеродонакопление, изучая потенциал *Pinus pinea* L. в агролесоводстве и методов управления для увеличения углеродных запасов. Установлено, что кедровые леса имеют высокий запас биомассы и потенциал хранения углерода, способствующий смягчению последствий изменения климата. Также, в экосистеме кедра агролесоводство может создать рабочие места и повысить уровень жизни местного населения. Результаты работы являются основой для улучшения посадок сосен и инструментов для оценки биомассы, что поможет точно оценить углеродные запасы в кедровых насаждениях.

В следующем исследовании авторы Baek G., Bae E.-J., Kim C. сравнили распределение углерода (C) и азота (N) в плантации экзотического японского кедра (*Cryptomeria japonica*) и естественном дубе пильчатом. За исключением ветвей, концентрации C были значительно выше ($p < 0,05$) в плантации кедра, тогда как концентрации N, кроме коры ствола, были ниже. Лесовосстановление значительно увеличило запасы углерода в надземной биомассе и азота в лесной подстилке и минеральных почвах по сравнению с дубовыми насаждениями. Запасы N в надземной биомассе зависели от концентрации N или запасов C в деревьях, а запасы C и N в почве отрицательно коррелировали с параметрами плодородия, такими как отношение C/N [2].

Количественная оценка углеродных пулов биомассы важна для понимания углеродного цикла в лесных экосистемах. В публикации изучалось влияние возраста древостоя на распределение биомассы и накопление углерода в насаждениях китайской ели в горах Даби. Общее количество углерода в биомассе 18 деревьев варьировало от 57,6 до 211,4 мг/га в древостоях разного возраста. Возраст древостоя значительно влиял на распределение биомассы,

увеличивая долю корневой биомассы. Увеличение срока севооборота плантации китайской ели может способствовать долгосрочной продуктивности и значительному поглощению углерода. Эти данные полезны для моделирования продуктивности лесных плантаций китайской ели [16].

Интеграции агролесоводческих систем для достижения целей по смягчению последствий изменения климата, в компенсации выбросов парниковых газов, изучали в своей работе Dhyani S. [6] и другие. Южная Азия признает важность агролесных систем, но отсутствие единых методологий для мониторинга углерода в деревьях и почве является значительным ограничением, так же как нехватка воды, права фермеров и др. Обзор работ авторов подчеркивает необходимость в реализации мер, для достижения климатических целей, сценариями углеродной нейтральности и устойчивыми местными средствами. Исследованием в приусадебных участках занимался Rahman M. M. и другие авторы [15]. Они оценили древесный покров и влияние разнообразия деревьев на накопление углерода. Для оценки покрытия деревьями использовался метод неконтролируемой классификации, который показал высокое покрытие с точностью 96,52%. Биомасса и органический углерод почвы ($p < 0,05$) значительно различались между восемью деревьями, тогда как общий запас углерода не имел значительных различий ($p > 0,05$). Разнообразие Шеннона влияло на углерод биомассы и органический углерод верхнего слоя почвы как напрямую, так и косвенно, при этом базальная площадь опосредовала косвенное влияние. Площадь основания и высота деревьев положительно влияли на углерод биомассы и общее накопление углерода. Эти результаты подчеркивают важность поддержания высокого разнообразия и высоты деревьев для максимизации накопления углерода.

Вторжение инвазивных видов негативно сказывается на биоразнообразии, изменяет экосистемные услуги и другие функции. Ландшафтная неоднородность экотонов может влиять на процесс инвазии, а оценка инвазивности различных типов лесов поможет понять, как виды

сопротивляются негативному воздействию. Xie P. [24] сравнивал составы, структуры, разнообразие и устойчивость подлескового сообщества на заброшенных землях, сильно заселенных *Mikania micrantha* и *Borrelia*. Его исследование показало, что присутствуют высокие концентрации доступного железа (Fe) и бора (B) и низкие уровни ртути (Hg). Анализ канонического соответствия (ССА) отразил связь типов насаждений с факторами окружающей среды. Индекс устойчивости и видового разнообразия варьировал, при этом устойчивость подлесковых сообществ на заброшенных землях была ниже, чем у других типов насаждений.

Aubrey D. P. и другие [1] использовали лесные кадастры для оценки запасов углерода, ежегодных потоков углерода и чистого производства биомассы (NBP) за 50 лет в результате облесения около 80 000 га. С 1955 по 2001 год удалено 1340,3 Гг углерода при сборе урожая, а ежегодные абсорбции варьировали. Экспорт углерода составил менее 0,5% от общего объема. Углерод из корней и другого собранного материала, оставшегося в использовании или на свалках, составил 49,3% от общего объема собранного углерода, а минеральный почвенный углерод — 41,6-50%. Aubrey D. P. также выявил дефицит углерода в почве в размере 19–20 мг С/га, что указывает на потенциал для будущего связывания углерода в постсельскохозяйственных почвах. Это подчеркивает необходимость управления лесами для накопления углерода, особенно в сосновых саваннах с низкой плотностью.

Результаты исследований. Выполненные для территории Красноярского края работы по выявлению процессов зарастания на бывших сельскохозяйственных землях с применением данных дистанционного зондирования Земли среднего, высокого и высокого пространственных разрешений и ГИС- технологий показали следующие результаты. Определены границы и площади участков, заросших лесной растительностью, которая составила 174 тыс. га, количество – 10,7 тыс. шт., средний размер участка – порядка 16 га. Территориально выявленные участки относятся к 36

административным районам Красноярского края и располагаются в границах 38 лесничеств. Максимальные площади зарастающих лесом залежных земель наблюдаются в Ирбейском (16,3 тыс. га), Пировском (13,2 тыс. га), Каратузском (11,6 тыс. га) административных районах.

В целом интенсивность зарастания залежных сельскохозяйственных земель довольно высокая. Максимальная площадь наблюдается в Ачинско-Боготольском (90 %) земледельческом округе, а минимальная – в Канском (82 %). В основном зарастание происходит мягколиственными породами (6210 участков общей площадью 106,0 тыс. га). Хвойная хозсекция насчитывает 4449 участков общей площадью 67,8 тыс. га. Возраст молодняков варьирует от 1 года до 35 лет. Основная доля участков представлена древостоями от 10 до 25 лет.

Установлено, что запас углерода в насаждениях на постагрогенных землях варьирует от 0,73 до 528,42 тыс. тС, при этом средний составляет 123,27 тыс. тС. В мягколиственных древостоях средние запасы составляют 22 т/га, в сосновых – 28 т/га. Максимальная продуктивность сосновых насаждений наблюдается в центральных районах Красноярского края. Тогда как для мягколиственных древостоев наиболее перспективными с точки зрения реализации ЛКП (лесоклиматических проектов) преимущественно являются южные районы края.

Заключение. Рассматривая все вышеперечисленные исследования об углероде в постаграрных, заброшенных и неиспользуемых землях, везде подчеркивается важность лесов и агролесоводческих систем в секвестрации углерода, восстановлении деградированных земель и смягчении последствий изменения климата. Эффективное управление лесными насаждениями, учет факторов почвенного состава и экологических условий позволяют оптимизировать накопление углерода в биомассе и почве, а также способствуют сохранению биоразнообразия. Внедрение устойчивых методов лесовосстановления, агролесоводства и мониторинга углеродных запасов

является ключевым направлением для достижения климатических целей и обеспечения экологической стабильности.

Исследования также показывают, что дистанционное зондирование, геоинформационные системы и моделирование значительно повышает точность оценки запасов и эффективности мер по их увеличению. Также важным аспектом является развитие механизмов финансирования проектов по восстановлению лесных экосистем, что способствует участию местных растительных сообществ, формированию учета будущих насаждений. В целом, научные данные и новые технологии являются залогом успешной борьбы с изменением климата через управление лесными ресурсами.

На примере Красноярского края представлены региональные особенности процессов зарастания постаграрных земель и возможность реализации лесоклиматических проектов в южных регионах России.

Библиографический список

1. Aubrey D. P., Blake J. I., Zarnoch S. J. From farms to forests: landscape carbon balance after 50 years of afforestation, harvesting, and prescribed fire // Forests. 2019. Т. 10, № 9. С. 760. <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/9/760>.

2. Baek G., Bae E.-J., Kim C. A stand-level comparison of carbon and nitrogen distribution in an exotic Japanese cedar plantation and a natural oak stand // Forests. 2021. Т. 12, № 8. С. 963. <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/8/963>.

3. Belay B., Pötzelsberger E., Hasenauer H. The carbon sequestration potential of degraded agricultural land in the Amhara region of Ethiopia // Forests. 2018. Т. 9, № 8. С. 470. DOI: 10.3390/f9080470.

4. Chen C.-I., Wang Y.-N., Lin H.-H., Wang C.-W., Yu J.-C., Chen Y.-C. Seasonal photosynthesis and carbon assimilation dynamics in a Zelkova serrata (Thunb.) Makino plantation // Forests. 2021. Т. 12, № 4. С. 467. <https://doi.org/10.3390/f12040467>. 5. -2 . Zhang L., Lai G., Zeng W., Zou W., Yi S.

Effect of climate on carbon storage growth models for three major coniferous plantations in China based on national forest inventory data // *Forests*. 2022. T. 13, № 6. C. 882. DOI: 10.3390/f13060882.

5. Danise T., Andriuzzi W. S., Battipaglia G., Certini G., Guggenberger G., Innangi M., Mastrolonardo G., Niccoli F., Pelleri F., Fioretto A. Mixed-species plantation effects on soil biological and chemical quality and tree growth of a former agricultural land // *Forests*. 2021. T. 12, № 7. C. 842. <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/7/842>.

6. Dhyani S., Murthy I. K., Kadaverugu R., Dasgupta R., Kumar M., Gadpayle K. A. Agroforestry to achieve global climate adaptation and mitigation targets: are South Asian countries sufficiently prepared? // *Forests*. 2021. T. 12, № 3. C. 303. <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/3/303>.

7. Ferraz de Almeida R., Rodrigues Mikhael J. E., Oliveira Franco F., Fonseca Santana L. M., Wendling B. Measuring the labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in forested and agricultural soils: a study under tropical conditions // *Forests*. 2019. T. 10, № 7. C. 544. <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/7/544>.

8. García-Campos E., Zorita F., Leirós M. C., Gil-Sotres F., Trasar-Cepeda C. Evaluation of C stocks in afforested high quality agricultural land // *Forests*. 2022. T. 13, № 12. C. 2055. DOI: 10.3390/f13122055.

9. Geraldo de Carvalho F., Duarte L., Nakamura G., Dubal dos Santos Seger G., Juen L. Changes of phylogenetic and taxonomic diversity of Odonata (Insecta) in response to land use in Amazonia // *Forests*. 2021. T. 12, № 8. C. 1061. <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/8/1061>.

10. Kizeková M., et al. Above and below ground biomass and carbon stock in permanent grasslands of Slovakia // *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)*. 2019. T. 65, № 4. C. 155–163. DOI: 10.2478/agri-2019-0016.

11. Li Y., Luo T., Li S., Liu B. Modeling optimal forest rotation age for carbon sequestration in the Great Khingan Mountains of Northeast China // *Forests*. 2022. T. 13, № 6. C. 838. DOI: 10.3390/f13060838.

12. Marçal M. F. M., Souza Z. M. d., Tavares R. L. M., Farhate C. V. V., Oliveira S. R. M., Galindo F. S. Predictive models to estimate carbon stocks in agroforestry systems // *Forests*. 2021. Т. 12, № 9. С. 1240. <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/9/1240>.
13. Mechergui K., Nagmouchi S., Al-Tami A., Jhaouadi W. Оценка биомассы, способности накапливать углерод и агролесомелиоративной ценности кедра (*Pinus pinea* L.): обзор // *Cerne*. 2021. Т27. №1. URL: <https://cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/2938>.
14. Novák J., et al. Influence of plant species and grasslands quality on sequestration of soil organic carbon // *Ekológia (Bratislava)*. 2020. Т. 39, № 3. С. 289–300. DOI: 10.2478/eko-2020-0023.
15. Rahman M. M., Kundu G. K., Kabir M. E., Ahmed H., Xu M. Assessing tree coverage and the direct and mediation effect of tree diversity on carbon storage through stand structure in homegardens of southwestern Bangladesh // *Forests*. 2021. Т. 12, № 12. С. 1661. <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/12/1661>.
16. Separation of biomass and carbon accumulation in a *Cunninghamia lanceolata* chronosequence plantations in the Dabi Mountains of Eastern China // *Dendrobiology*. 2016. Vol. 76. P. 165-174. Available at: <https://www.idpan.poznan.pl/index.php/content-dendrobiolgy/v76/1832-76-165-174>.
17. Siarudin M., Rahman S. A., Artati Y., Indrajaya Y., Narulita S., Ardha M. J., Larjavaara M. Carbon sequestration potential of agroforestry systems in degraded landscapes in West Java, Indonesia // *Forests*. 2021. Т. 12, № 6. С. 714. <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/6/714>.
18. Tian X., Ge X., Zhou B., Li M. The linkage of soil CO₂ emissions in a Moso bamboo (*Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau) plantation with aboveground and belowground stoichiometry // *Forests*. 2021. Т. 12, № 8. С. 1052. <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/8/1052>.
19. Truax B., Fortier J., Gagnon D., Lambert F. Planting density and site effects on stem dimensions, stand productivity, biomass partitioning, carbon stocks

and soil nutrient supply in hybrid poplar plantations // *Forests*. 2018. Т. 9, № 6. С. 293. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/ID-BFT-170428>.

20. Varnagirytė-Kabašinskienė I., Žemaitis P., Armolaitis K., Stakėnas V., Urbaitis G. Soil organic carbon stocks in afforested agricultural land in Lithuanian hemiboreal forest zone // *Forests*. 2021. Т. 12, № 11. С. 1562. <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/11/1562>.

21. Waymouth V., Miller R. E., Kasel S., Ede F., Bissett A., Aponte C. Soil bacterial community responds to land-use change in riparian ecosystems // *Forests*. 2021. Т. 12, № 2. С. 157. DOI: 10.3390/f12020157.

22. Wiatrowska K., Komisarek J., Olejnik J. Variations in organic carbon content and dehydrogenases activity in post-agriculture forest soils: a case study in South-Western Pomerania // *Forests*. 2021. Т. 12, № 4. С. 459. <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/4/459>.

23. Wiśniewski P., Märker M. Comparison of topsoil organic carbon stocks on slopes under soil-protecting forests in relation to the adjacent agricultural slopes // *Forests*. 2021. Т. 12, № 4. С. 390. <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/4/390>.

24. Xie, P.; Liu, T.; Chen, H.; Su, Z. Community Structure and Soil Mineral Concentration in Relation to Plant Invasion in a Subtropical Urban and Rural Ecotone. *Forests* 2021, 12, 185. <https://doi.org/10.3390/f12020185>

25. Yasin G., Nawaz M. F., Martin T. A., Niazi N. K., Gul S., Yousaf M. T. B. Evaluation of agroforestry carbon storage status and potential in irrigated plains of Pakistan // *Forests*. 2019. Т. 10, № 8. С. 640. <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/8/640>.

26. Zhang L., Lai G., Zeng W., Zou W., Yi S. Effect of climate on carbon storage growth models for three major coniferous plantations in China based on national forest inventory data // *Forests*. 2022. Т. 13, № 6. С. 882. <https://doi.org/10.3390/f13060882>.

27. Беляева Н. В., Аникина Е. В., Сергеева А. С. Естественное лесовосстановление на постагрогенных землях в условиях Ленинградской

области // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XVII Международной научно-технической конференции / отв. ред. Ю. М. Авдеев. 2019. С. 7–9.

28. Беляева Н. В., Данилов Д. А., Кази И. А. Особенности естественного возобновления ели европейской на постагrogenных землях // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2019. № 54. С. 6–10.

29. Герасимова О. А., Мельник А. И., Мамедова С. К., Попова В. В., Андронова А. А., Немич В. Н., Михайлов П. В. Оценка биомассы высокоплотных сосняков на залежных землях в условиях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2022. № 62. С. 18–24.

30. Чернова О. В., Рыжова И. М., Подвезенная М. А. Изменение величины и структуры запасов углерода в регионах южной тайги и лесостепи европейской России за исторический период // Живые и биокосные системы. 2017. № 19. С. 2.

Оригинальность 86%