



## **Запасы фитомассы подлесочных пород и их прирост в лесостепных экосистемах Окско-Донской равнины**

Нелли П. Карташова✉, Kartashova\_73@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2535-9557>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»,  
ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

### **Аннотация**

**Введение.** Изучение запасов и годичной динамики фитомассы подлесочных пород в лесостепных экосистемах Окско-Донской равнины имеет важное значение для понимания вклада различных ярусных компонентов леса в углеродный цикл, особенно в условиях меняющегося климата.

**Цель исследования.** Оценить запасы фитомассы подлесочных пород и их ежегодный прирост в разных типах лесных экосистем указанного региона, а также определить их роль в накоплении и динамике углерода.

**Материалы и методы.** Исследования проведены на постоянных пробных площадях в двух типах лесных экосистем Воронежской области: (1) чистом сосновом древостое Левобережного лесничества и (2) смешанных лиственных насаждениях дуба черешчатого с примесью липы мелколистной, клёна остролистного и ясеня обыкновенного (Правобережное лесничество). Для каждого вида подлеска определяли видовую принадлежность, категорию состояния, структуру яруса, высоту, ширину, величины проективного покрытия и другие дендрометрические показатели. Запасы углерода в фитомассе рассчитывались таксационными методами. Годичная чистая первичная продукция (ЧПП) определялась по динамике запасов надземной биомассы.

**Результаты.** Установлено, что подлесок вносит существенный вклад в формирование запасов биомассы и накопление углерода в лесных экосистемах региона. Наибольшие значения годичного прироста фитомассы зарегистрированы в старовозрастных дубовых насаждениях в условиях свежей дубравы, что связано с повышенной продуктивностью под влиянием богатого слоя лесной подстилки и гумуса. В сосновых древостоях наблюдается меньший прирост и менее сложная структура подлеска.

**Закключение.** Полученные данные расширяют представления о структурно-функциональной организации подлеска в различных типах лесостепных экосистем и его роли в биогеохимическом цикле углерода. Результаты могут быть использованы для совершенствования систем мониторинга углерода и планирования адаптивного управления лесами с учётом климатических целей.

**Ключевые слова:** подлесок, фитомасса, запасы углерода, лесостепь, годичный прирост, постоянные пробные площади, биологическая продуктивность, структура растительного сообщества.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1023013000012-7 «Биогеохимический мониторинг цикла углерода в природных и антропогенных экосистемах Воронежской области в условиях глобального изменения климата (FZUR-2023-0001)»

**Благодарности:** автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Карташова Н.П. Запасы фитомассы подлесочных пород и их прирост в лесостепных экосистемах Окско-Донской равнины. / Н.П. Карташова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 29-46. – Библиогр.: с. 43-46 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/3>.

*Поступила 23.02.2025. Пересмотрена 25.03.2025. Принята 5.06.2025. Опубликована онлайн 26.06.2025.*

*Article*

## **Reserves of phytomass of understory rocks and their growth in forest-steppe ecosystems of the Oka-Don Don plain**

**Nelli P. Kartashova**✉, Kartashova\_73@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2535-9557>

*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev str., Voronezh, 394087, Russian Federation*

### **Abstract**

**Introduction.** The study of stocks and annual dynamics of phytomass of undergrowth species in forest ecosystems of the Oksko-Donskaya Plain is important for understanding the contribution of different tier forest components to the carbon cycle, especially under changing climate conditions.

**Aim of the study** is to estimate phytomass stocks of undergrowth species and their annual growth in different types of forest ecosystems of the specified region, as well as to determine their role in carbon accumulation and dynamics.

**Materials and Methods.** The studies were conducted on permanent sample plots in two types of forest ecosystems of the Voronezh Region: (1) pure pine stands of the Levoberezhnoye forest division and (2) mixed deciduous stands of pedunculate oak (*Quercus robur*) with admixture of small-leaved lime (*Tilia cordata*), sharp-leaved maple (*Acer platanoides*) and common ash (*Fraxinus excelsior*) (Pravoberezhnoye forest division). For each undergrowth species, species affiliation, condition category, understorey structure, height, width, projective cover values and other dendrometric parameters were determined. Carbon stocks in phytomass were calculated using taxation methods. Annual net primary production (NPP) was determined by the dynamics of aboveground biomass stocks.

**Results.** It was found that undergrowth makes a significant contribution to the formation of biomass stocks and carbon storage in forest ecosystems of the region. The highest values of annual phytomass growth were recorded in old-growth oak stands under fresh oak forest conditions, which is associated with increased productivity under the influence of a rich layer of forest litter and humus. In pine stands, lower growth and less complex undergrowth structure are observed.

**Conclusion.** The data expand the ideas about the structural and functional organisation of undergrowth in different types of forest-steppe ecosystems and its role in the biogeochemical carbon cycle. The results can be used to improve carbon monitoring systems and adaptive forest management planning with climate targets in mind.

**Keywords:** undergrowth, phytomass, carbon stocks, forest-steppe, annual growth, permanent sample plots, biological productivity, plant community structure

**Funding:** the study was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 1023013000012-7 "Biogeochemical monitoring of the carbon cycle in natural and anthropogenic ecosystems of the Voronezh region under conditions of global climate change (FZUR-2023-0001)")

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Kartashova N.P. (2025). Reserves of phytomass of understory rocks and their growth in forest-steppe ecosystems of the Oka-Don flatland. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 29-46 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/3>.

*Received 23.02.2025. Revised 25.03.2025. Accepted 5.06.2025. Published online 26.06.2025.*

### **Введение**

Численные результаты многочисленных научных исследований убедительно свидетельствуют о значимой роли лесных экосистем в глобальном углеродном цикле [2]. В период с 2010 по 2019 год, по экспертным оценкам, сухопутные экосистемы ежегодно поглощали порядка 12,5 млрд тонн диоксида углерода, при этом наибольшая доля аккумулировалась именно в лесах [3,4]. Лесные массивы являются крупнейшими наземными резервуарами углерода [5]. Особенности биологического круговорота и длительный жизненный цикл основных лесообразующих пород, характерные для бореальных и умеренных широт России, способствуют значительному накоплению углерода не только в фитомассе, но и в лесной подстилке, гумусе почв и торфяниках [6]. Благодаря долговременному запасанию углерода, лесные экосистемы играют ключевую роль в смягчении последствий выбросов парниковых газов и противодействии климатическим изменениям на планете. Захват и хранение углерода — важнейшие экосистемные функции лесов. Следует отметить, что несмотря на возрастание концентрации углекислого газа в атмосфере за последнее столетие, этот процесс, к сожалению, не сопровождался соразмерным увеличением фитомассы растительности [1].

Глобальное потепление климата, обусловленное антропогенным воздействием на окружающую среду, способствовало существенному росту интереса к вопросам оценки углеродного цикла лесных экосистем. В настоящее время данный интерес выходит за пределы фундаментальных научных исследований и находит практическое воплощение в сфере лесопользования. В частности, формирование углеродных ферм и внедрение систем компенсации выбросов в лесном хозяйстве рассматриваются как перспективные направления устойчивого лесопользования, эффективных мер противодействия изменению климата и создания новых источников дохода [7].

Оценка запасов и потоков углерода в лесных экосистемах приобретает фундаментальное значение для глубокого понимания их вклада в процессы смягчения последствий изменения климата [8]. Достоверное количественное определение углеродного баланса лесов позволяет не

только уточнять масштабы их секвестрационного потенциала, но и разрабатывать эффективные стратегии управления для дальнейшего увеличения их компенсирующей роли. На протяжении последних десятилетий лесные экосистемы в глобальном масштабе сохраняют статус нетто-стока углерода, ежегодно поглощая от 3,6 до 7,6 Гт CO<sub>2</sub>-эквивалента по разным оценкам, что составляет значительную долю антропогенных выбросов парниковых газов [9,10].

Около 45% мировых запасов углерода аккумулируется именно в лесных экосистемах. При этом углерод распределен между различными компонентами: основной его объем заключен в биомассе деревьев — стволах, ветвях, листьях и корневой системе, а также в подлеске, мертвой древесине и почвенном органическом веществе. Особое внимание уделяется оценке почвенного углерода и лесной подстилки, поскольку именно эти фракции характеризуются долговременным хранением и наибольшей устойчивостью к климатическим изменениям.

Комплексный анализ динамики углеродных запасов и потоков в лесах требует интеграции данных дистанционного зондирования, натурных инвентаризаций и моделей биогеохимических циклов. Такой подход позволяет выявлять пространственные и временные особенности накопления и высвобождения углерода, анализировать влияние природных и антропогенных факторов на углеродный баланс. В современных условиях результаты подобных исследований становятся важнейшей научной основой для разработки механизмов климатически адаптированного и устойчивого лесопользования.

Информация о динамике накопления, распределения и трансформации органического вещества в различных компонентах лесных фитоценозов — древесном, подлесочном, напочвенном покрове, лесной подстилке и почве — обладает фундаментальной значимостью для комплексной оценки роли лесных экосистем в глобальном углеродном цикле как на региональном, так и на мировом уровнях [11,12]. Анализ различных лесных формаций показывает, что вклад тропических, бореальных и умеренных лесов в глобальный углеродный баланс существенно различается ввиду контрастов климатических условий, особенностей

структуры, биомассы и продукционной специфики.

Тропические леса отличаются наивысшей первичной продуктивностью, интенсивными темпами накопления органического вещества, а также превосходящим другие типы лесов объёмом ежегодного поглощения углерода. В то же время бореальные лесные комплексы, несмотря на относительно низкие темпы прироста биомассы, играют критически важную роль в долговременной аккумуляции углерода за счёт большой площади распространения и значительных запасов органического вещества, в первую очередь — в почвах и напочвенном слое. Умеренные леса занимают промежуточное положение по запасам и продуктивности; рациональное и устойчивое управление ими способно существенно повысить их вклад в глобальные процессы секвестрации углекислого газа.

Для достоверной и всесторонней оценки вклада лесных экосистем в формирование углеродного цикла требуется учёт содержания и распределения углерода во всех основных компонентах экосистемы. Это включает древесную, подлесочную, травяную, напочвенно-подстилочную и почвенную фракции, каждая из которых участвует в процессах поглощения, депонирования и выделения углерода. Динамические характеристики потоков органического вещества между этими компонентами во многом определяют интегральную углеродную функцию леса.

Исследование структурно-динамических особенностей и продукционного потенциала древостоев и сопутствующих ярусов в различных типах лесных насаждений приобретает исключительно важное значение. Эти параметры выступают индикаторами адаптивных способностей лесных фитоценозов к изменяющимся абиотическим факторам среды, в том числе к росту температуры, изменению режима осадков и воздействию иных климатических стрессоров [13]. В свою очередь, результаты подобных исследований позволяют совершенствовать современные модели оценки биоразнообразия, стабильности и устойчивости лесных экосистем.

Следует подчеркнуть, что растительная фитомасса лесов – как в живой, так и в мёртвой органике – представляет собой весьма значимый, однако не доминирующий глобальный пул углерода.

Абсолютно преобладающими резервуарами остаются океанические системы и почвенные горизонты планеты, тем не менее роль лесов в глобальной регуляции содержания атмосферного  $\text{CO}_2$ , поддержании биотического разнообразия и обеспечении биосферной стабильности трудно переоценить. Лесные экосистемы функционируют как эффективный биологический насос, связывая атмосферный углерод, и выступают стратегическим ресурсом для смягчения последствий климатических изменений.

Оценка запасов органической массы растений в лесных фитоценозах является одним из ключевых индикаторов, отражающих как общую продуктивность лесных экосистем, так и процессы их восстановления. Несмотря на важность этого направления исследований, в отечественной и зарубежной литературе преобладает внимание к фитомассе древесного яруса, в то время как сведения о запасах и динамике фитомассы подлеска представлены крайне фрагментарно [14-16]. В этой связи особенно актуальной задачей остаётся разработка методических подходов, позволяющих получать репрезентативные данные о запасах органического вещества нижних ярусов с оптимальным соотношением между простотой и точностью учёта, что необходимо как для научных, так и для практических целей оценки и освоения различных видов растений.

Одним из перспективных направлений является выявление количественных зависимостей между фитомассой подлеска и объективными таксационными показателями, такими как видовой состав и возраст древостоя, тип леса, бонитет и полнота насаждения. Нахождение подобных взаимосвязей позволит существенно упростить и стандартизировать процедуры оценки запасов подлеска в лесных фитоценозах различных типов.

Проблема определения текущего прироста фитомассы лесных насаждений, и особенно подлесочного яруса, относится к числу наиболее методически сложных и трудоёмких в современных лесозоологических исследованиях (Молчанов, Смирнов, 1967; Усольцев, 1998).

Целью данной работы является получение эмпирических данных о структуре надземной био-

массы и количественной оценке прироста подлесочных видов, произрастающих в лесостепных экосистемах Окско-Донской равнины.

Актуальность исследования определяется необходимостью пополнения современных баз данных по биологической продуктивности и фитомассе лесных фитоценозов, что имеет важное значение для анализа динамики лесных ресурсов, совершенствования прогнозных моделей продукционно-углеродного баланса и разработки эффективных природоохранных и лесохозяйственных мер.

### **Материалы и методы**

Постоянные пробные площади (ППП) площадью 1 га были заложены на малонарушенных участках спелых и перестойных лесных насаждений возрастом 100–140 лет в следующих кварталах: № 60, выдел 2 (ППП № 3), № 76, выдел 6 (ППП № 15), № 59, выдел 5 (ППП № 16) (Левобережное участковое лесничество), а также в квартале № 47, выдел 3 (ППП № 6), квартале № 9, выдел 52 (ППП № 11), квартале № 35, выдел 6 (ППП № 12), квартале № 28, выдел 18 (ППП № 13), квартале № 34, выдел 11 (ППП № 14) на территории Правобережного лесничества в водоохранной зоне. В условиях лесополос Каменной степи (возраст насаждений – 120 лет) были также заложены постоянные пробные площади: ППП № 8 — площадью 0,25 га; ППП № 9 — 0,5 га; ППП № 10 — 0,5 га.

Пробные площади отличаются по типу лесорастительных условий и степени влажности почвы. В частности, ППП № 3 заложена в условиях свежей субори, ППП № 6 и № 14 — в условиях свежей судубравы, ППП № 11 — в условиях сухой дубравы, ППП № 12 и № 13 — в условиях свежей дубравы, ППП № 15 — в условиях свежего бора, ППП № 16 — в условиях влажной субори.

На каждой постоянной пробной площади были организованы учетные площадки размером 5×5 м, на которых осуществлялась регистрация всех видов подлесочных пород, измерялись высота и диаметр каждого экземпляра, определялось проективное покрытие и оценивалось жизненное состояние растений. В соответствии с результатами таксационных измерений для каждого вида древесных растений подлеска отбирались особи различной высоты, которые затем срезались у поверхности почвы для последующего определения массы ствола, ветвей и листьев. Подземная часть

(корни) извлекалась и обрабатывалась в соответствии с общепринятыми методическими рекомендациями [14–16]. Все фракции фитомассы взвешивали в сыром виде, далее отбирались контрольные образцы для определения влажности. Эти образцы высушивались в сушильных шкафах при температуре 105°C до постоянной массы [15]. Полученные значения использовались для перерасчёта массы всех фракций на абсолютно сухой вес.

Фитомасса является ключевым компонентом природного углеродного цикла, итогом продуцирования биогеоценоза и представляет собой органическую массу определенной структуры [11,12,16].

Для определения запасов фитомассы подлеска в исследуемых фитоценозах был применён метод модельных деревьев с последующим использованием аллометрических уравнений для оценки массы отдельных фракций древесных растений и общей фитомассы подлесочных пород [17–19].

Для перевода значений фитомассы древесного и её структурных фракций в запасы углерода использовались конверсионные коэффициенты, рекомендованные МГЭИК для лесов умеренной зоны: 0,48 для лиственных и 0,51 для хвойных пород [20].

Оценка биологической продуктивности древостоев по данным, полученным на постоянных пробных площадях, осуществлялась в соответствии с методикой, изложенной в работе А.И. Уткина с соавторами (2005) [21].

Ежегодный прирост подлесочных пород определяли методом анализа годичных приростных колец на модельных экземплярах, что позволило установить возраст каждого изучаемого растения. На основании полученных данных рассчитывали среднюю массу абсолютно сухого вещества (за исключением листьев) модельного экземпляра для каждой породной группы. Для вычисления среднегодового прироста древесины (ствол и ветви) индивидуального растения проводили деление общей массы на возраст выбранного экземпляра. Полученное значение, умноженное на численность данной породы на 1 га, позволяло оценить ежегодный прирост древесины соответствующей породы в пересчете на гектар.

Суммируя данные прироста по всем видам подлеска, определяли общий среднегодовой прирост древесины подлесочного яруса. Следует отметить, что подобная методика предусматривает усреднение темпов наращивания биомассы, не учитывая возрастную динамику роста; известно, что прирост подлесочных пород варьирует на различных стадиях их онтогенеза. Тем не менее, вложенная неточность мало сказывается на конечных результатах, учитывая относительно небольшую долю подлеска в общей фитомассе лесных насаждений по сравнению с древостоем.

Отсутствие единого стандарта оценки данного показателя предопределяет допустимый уровень погрешности в результатах. Согласно литературным данным, для научных исследований эта погрешность может составлять 5–19%, а при лесоустройственных работах и планировании рубок ухода — 10–20%, что позволяет признать выбранную методику удовлетворительно точной для решения поставленных исследовательских и прикладных задач.

Определение годовичного прироста корневой массы в лесных фитоценозах представляет собой сложную исследовательскую задачу, поскольку извлечение полного объёма корневой системы, в особенности мелких и тонких корней, сопряжено с значительными методическими трудностями. Кроме того, в отличие от стволов древесных растений, корни не формируют выраженные годовичные кольца прироста, что затрудняет проведение прямых дендрохронологических измерений и оценки ежегодного прироста их массы.

В связи с этим для количественной оценки прироста корней в исследуемых фитоценозах применялся косвенный (аллометрический) метод расчёта, основанный на определении процентных соотношений между массой основных фитомассных фракций (ствол, ветви, корни) в модельных экземплярах подлесочных пород. Расчёт осуществлялся по соответствующей формуле (1), предложенной В.А. Усольцевым (2002), где прирост массы корней определяется на основании эмпирически установленных удельных весовых коэффициентов, характеризующих распределение биомассы между надземными и подземными органами.

Данный подход базируется на предположении о стабильности аллометрических соотношений между основными компонентами древесных растений в течение жизненного цикла, что позволяет экстраполировать величину ежегодного прироста надземных фракций на соответствующий прирост корневой массы. Несмотря на определённые ограничения и возможную вариабельность удельных коэффициентов в зависимости от экологических условий и биологических особенностей видов, описанный метод широко используется в экологических исследованиях для интегральной оценки динамики подземной фитомассы лесных экосистем.

$$Z_r = Z_c \frac{R}{C} \quad (1)$$

где  $Z_r$  – прирост корней (в весовых единицах);  
 $Z_c$  – прирост стволов и ветвей (в весовых единицах);

$R$  – доля корней от суммы весов ствола, ветвей и корней (в %);

$C$  – доля ствола и ветвей от суммы ствола, ветвей и корней (в %).

Прирост стволов и ветвей древесных растений оценивается на основании результатов таксационных измерений, включающих определение диаметра на высоте груди и высоты каждого экземпляра. Это позволяет точно рассчитать наращивание объёма и массы надземных фракций подлесочных пород в динамике.

Доля корней ( $R$ ) определяется как отношение массы корневой системы к суммарной массе дерева (стебель + ветви + корни), отражая вклад подземных органов в общую биомассу растения. Аналогично, доля ствола и ветвей ( $C$ ) — это отношение совокупной массы ствола и ветвей к общей биомассе.

Расчёт прироста подземной биомассы ( $ZR$ ) осуществляется по аллометрической формуле, согласно которой прирост корней пропорционален значению прироста надземной части ( $Zc$ ), скорректированному на структурное соотношение долей корней и надземных фракций в общей массе растения. Величина  $Zc \times R$  отражает ту часть прироста надземной биомассы, которая пропорционально отнесена к корневой системе и может быть учтена как прирост подземной массы, в то время как последующее деление на структурную долю надзем-

ных фракций (С) обеспечивает нормализацию данного значения относительно всей биомассы исследуемых экземпляров, а не только их надземной части.

Таким образом, подобный подход позволяет учесть реальное структурное соотношение между надземной и подземной массой при оценке динамики прироста корневой системы. Это особенно важно для адекватного моделирования биомассообразования и баланса углерода в лесных фитоценозах, поскольку позволяет минимизировать искажения, связанные с вариабельностью структуры древесной биомассы разных видов и возрастных состояний. Корректировка по соотношению долей обеспечивает более точную экстраполяцию прироста между органами, отражая структурно-функциональные особенности аллометрии древесных растений в лесных экосистемах.

### Результаты

Оценка запасов фитомассы древесно-кустарниковой растительности открывает возможность более точно определить объем депонированного углерода в лесных экосистемах, что приобретает особую актуальность в контексте глобальных климатических изменений. Показатель углеродного депонирования служит одним из ключевых критериев при анализе вклада лесов в процессы секвестрации углекислого газа и смягчения неблагоприятных климатических последствий. Данный параметр чрезвычайно важен для обоснования стратегий устойчивого лесопользования, формирования политики по адаптации лесного хозяйства к изменяющимся условиям, а также для активного участия в международных и национальных программах по компенсации парниковых выбросов, например, при реализации углеродных рынков и климатических проектов.

Особое значение в механизмах накопления органического вещества имеет подлесок — компонент лесного фитоценоза, включающий кустарниковую и травянистую растительность. Его роль в секвестрационных процессах во многом определяется видовым составом, уровнем биологического разнообразия и структурными характеристиками, в частности, густотой насаждений. Видовое многообразие и пространственная неоднородность подлеска способствуют увеличению общего биомассового и углеродного резерва, а также ускоряют

процессы круговорота питательных веществ и восстановления нарушенных участков экосистемы.

Таким образом, регулярная и комплексная оценка фитомассы и связанного с ней депонирования углерода в древесно-кустарниковых ярусах леса является важнейшим элементом мониторинга состояния лесных экосистем и формирования научно обоснованных решений по управлению лесными ресурсами в условиях климатических вызовов современности.

Подлесочные породы, произрастающие на территории дубрав, имеют по большей части среднюю густоту. Видовой состав подлеска довольно разнообразен и представлен лещиной обыкновенной (*Corylus avellana L.*), бересклетом бородавчатым (*Euonymus verrucosus L.*) и кленом полевым (*Acer campestre L.*). Данные породы произрастают на всей территории квартала 47, кроме выдела 9 (ольшаник) — там подлесок сформировали ильмовые и черемуха. Подлесок на территории сосновых насаждений встречается в кварталах 59, 60 и 76. В основном это рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia L.*), произрастающая редкими группами или отдельно растущими деревьями. Также встречается ирга круглолистная (*Amelanchier rotundifolia L.*) и малина обыкновенная (*Rubus idaeus L.*).

В таблице 1 представлены суммарные и фракционные запасы фитомассы подлеска. Наибольшие суммарные запасы фитомассы подлеска наблюдаем в условиях свежей дубравы (776,6 кг/га и 345,25 кг/га), наименьшие — в лесополосе №124 Каменной степи. Ведущая роль в накоплении фитомассы подлеска в условиях свежей дубравы принадлежит лещине обыкновенной (744,646 кг/га и 247,71 кг/га). Сравнивая полученные данные, можно отметить, что общая надземная фитомасса по сумме фракций (ствол, ветви, листья) в 3,4 раза превышает подземную фитомассу. Почти вся надземная фитомасса в исследуемых типах лесорастительных условий превышает подземную. Только в условиях свежей судубравы подземная фитомасса превышает в 1,6 раз надземную. Это связано с тем, что растения инвестируют больше ресурсов в развитие корневой системы, чем в развитие надземной части, также между растениями имеется конкуренция за воду и питательные вещества, что может стимулировать развитие корневой системы для более эффективного поглощения ресурсов в условиях свежей судубравы.

## Естественные науки и лес

Таблица 1

Суммарные и фракционированные запасы фитомассы подлеска на пробных площадях Пригородного лесничества Воронежской области и лесополосах Каменной степи, кг/га

Table 1

Total and fractionated stocks of undergrowth phytomass in the trial areas of the Prigorodny Forestry District of the Voronezh Region and the forest belts of the Stone Steppe, kg/ha

№ППП /Тип леса   PSP No/ type of forest	Виды растений   Types of plants	Фракции фитомассы		Phytomass fractions			Всего   Total
		Стволы и ветви   Trunks and branches	Листья   Leaves	Корни   Roots	Надземная фитомасса   Above-ground phytomass	Подземная фитомасса   Below-ground phytomass	
8/лесополоса №76 Каменной степи   8/ forest belt №76 The Stone Steppe	Бересклет   Beresklet	1,88	1,35	2,4	3,23	2,4	5,63
	Ирга круглолистная   Round-leaved irga	9,11	0,72	1,55	9,83	1,55	11,38
	Клен татарский   Tatar maple	22,2	8,4	58,0	30,6	58,0	88,6
	Черемуха   Bird cherry	1,00	0,186	3,63	1,19	3,63	4,82
	Всего   Total	34,19	10,65	65,58	44,85	65,58	110,43
9/лесополоса №124 Каменной степи   9/forest belt №124 The Stone Steppe	Бересклет   Beresklet	5,37	0,29	0,526	5,66	0,526	6,186
	Клен полевой   Field maple	0,648	0,086	0,0624	0,734	0,0624	0,7964
	Всего   Total	6,018	0,376	0,5884	6,394	0,5884	6,98
10/лесополоса №45 Каменной степи   10/forest belt №76 The Stone Steppe	Бузина красная   Red elderberry	0,136	0,064	0,64	0,2	0,64	0,84
	Бересклет   Beresklet	0,794	0,089	0,896	0,883	0,896	1,779
	Клен ясенелистный   Ash-leaved maple	87,11	19,11	40,56	106,22	40,56	146,78
	Всего   Total	88,044	19,263	42,1	107,11	42,1	149,4
11/ D <sub>1</sub>	Бересклет   Beresklet	2,23	0,768	2,84	2,996	2,84	5,836
	Рябина обыкновенная   Common mountain ash	10,98	2,19	24,0	13,175	24,0	37,175
	Клен полевой   Field maple	23,48	7,62	14,66	31,098	14,66	45,758
	Клен татарский   Tatar maple	8,28	0,68	9,46	8,96	9,46	18,42
	Роза   Rose	4,12	1,21	3,73	5,33	3,73	9,06
	Боярышник   Hawthorn	100,0	6,55	31,77	106,55	31,77	138,32
	Всего   Total	149,09	19,019	86,46	168,109	86,46	254,569
12/ D <sub>2</sub>	Лещина   Hazel	443,55	130,6	170,5	574,146	170,5	744,646
	Клен полевой   Field maple	9,78	3,72	12,0	13,5	12,0	25,5

## Естественные науки и лес

	Бузина красная   Red elderberry	0,027	0,013	0,02	0,04	0,02	0,06
	Бересклет   Beresklet	3,343	0,39	3,02	3,733	3,02	6,75
	Всего   Total	456,7	134,72	185,54	591,06	185,54	776,6
13/ D <sub>2</sub>	Лещина   Hazel	120,76	24,25	102,7	145,01	102,7	247,71
	Клен полевой   Field maple	33,17	8,43	25,1	41,6	25,1	66,7
	Бересклет   Beresklet	12,72	3,72	14,4	16,44	14,4	30,84
	Всего   Total	166,65	36,4	142,2	203,05	142,2	345,25
14/ C <sub>2</sub> Д	Бересклет   Beresklet	10,7	1,85	3,48	12,55	3,48	16,03
	Бузина красная   Red elderberry	0,38	0,22	0,51	0,6	0,51	1,11
	Лещина   Hazel	24,61	5,08	67,55	29,69	67,55	97,24
	Всего   Total	35,7	7,15	71,54	42,84	71,54	114,38
15/ A <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-
16/ B <sub>3</sub>	Ирга круглолистная   Round-leaved irga	38,2	4,2	27,01	42,4	27,01	69,41
	Малина обыкновенная   Ordinary raspberries	3,73	5,33	3,4	9,06	3,4	12,46
	Рябина обыкновенная   Common mountain ash	57,0	2,92	33,94	59,91	33,94	93,85
	Всего   Total	98,93	12,45	64,35	111,37	64,35	175,72

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Запас углерода был оценен в двух пулах: надземной и подземной фитомассе. Выявленные запасы углерода в растительности напрямую коррелируют с запасами её фитомассы.

Полученные результаты позволяют всесторонне оценить распределение запасов углерода между различными фракциями надземной и подземной фитомассы исследуемых лесных экосистем. Проведённые исследования показали, что максимальные значения запасов углерода фитомассы подлеска были зафиксированы в дубраве осоко-снытьевой (ППП №12) при средней густоте подлеска и составили 0,357 т/га. Это свидетельствует о высокой продуктивности и значительном вкладе подлеска в общий углеродный баланс именно в данном типе растительности. Также относительно высокие значения наблюдались в дубраве участка ППП №13, где запасы углерода подлеска достигли 0,172 т/га.

Вместе с тем минимальные значения были отмечены в лесополосе №124 (ППП №9) Каменной лесостепи, где запасы углерода фитомассы подлеска оказались существенно ниже и составили всего 0,0033 т/га. Такой низкий показатель может

быть обусловлен как особенностями местных экологических условий, так и составом растительных сообществ, густотой древесного и кустарникового ярусов, а также антропогенным воздействием на территорию.

В целом выявленные различия в запасах углерода подчеркивают значительное влияние типа лесной экосистемы, структуру ее насаждений, условий произрастания и характера формирования подлеска на процессы накопления и распределения углерода. Полученные данные могут быть использованы для дальнейших исследований углеродного баланса, оценки вклада подлеска в продукционные процессы, а также для выработки рекомендаций по сохранению и устойчивому управлению лесными экосистемами в условиях изменения климата.

Отметим достаточно выраженные различия в соотношении запасов углерода подземной фитомассы к запасам в надземной фитомассе (R:S) в дубраве на ППП №12 с преобладанием лещины обыкновенной в подлеске, которое значительно превышает единицу и составляет 4,7. По-видимому, в условиях, где конкуренция за почвенные

ресурсы среды является более острой, эта подлесочная порода формирует мощную корневую систему. Высокое значение R:S означает, что значительная часть углерода в этой дубраве депонирована под землей. Это делает экосистему более устойчивой к потерям углерода при пожарах или рубках, поскольку корни менее подвержены воздействию этих факторов. В дубраве на ППП №13 соотношение R:S уменьшается до 1,4. При этом на той и другой пробной площади наблюдается значительное преобладание углерода надземной фитомассы.

В сосновом насаждении на ППП №16 с преобладанием в подлеске рябины обыкновенной соотношение R:S составляет 1,73, что свидетельствует об адаптации растений к конкретным условиям, о балансе между надземной и подземной биомассой, который обусловлен достаточным количеством влаги и питательных веществ в почве,

оптимальным освещением и невысокой конкуренцией за ресурсы.

Существенное различие запасов углерода в фитомассе надземной и подземной части наблюдается в лесополосе №76 Каменной степи (ППП №10), где преобладающей подлесочной породой является клен ясенелистный (*Acer negundo L.*), а также имеется значительное количество бузины красной (*Sambucus racemosa L.*). Запас углерода в надземной части в 2,5 раз превышает запас углерода в подземной части. Наблюдаемое соотношение R:S является результатом взаимодействия антропогенных факторов и специфической адаптации произрастающих пород растений. Искусственное создание лесополос, выбор пород, агротехнические мероприятия и особенности землепользования могли усилить естественную тенденцию растений к формированию более развитой надземной части в условиях засушливого климата.

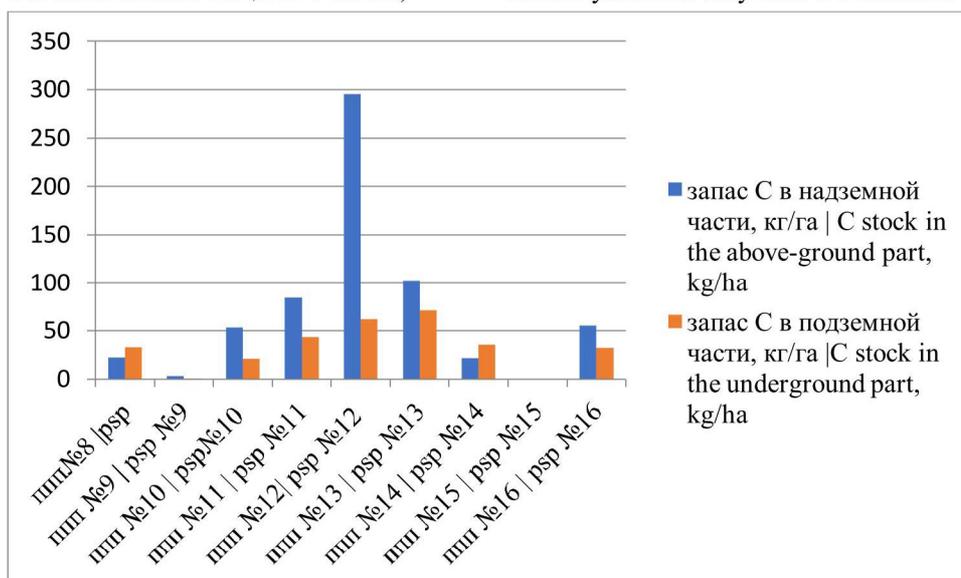


Рисунок 1. Гистограмма соотношения запасов углерода надземной и подземной частей подлеска на ППП

Figure 1. A histogram of the ratio of carbon reserves of the aboveground and underground parts of the undergrowth at the PSP

Источник: собственная композиция авторов  
Source: the author's composition

Анализируя полученные данные, можно отметить, что по большинству площадок запасы углерода в надземной части существенно превышают таковые в подземной.

Например, на площадке "псп №12" фиксируется аномально высокий запас углерода в надземной части, достигающий почти 300 кг/га, в то время как содержание углерода в подземной части здесь относительно невелико и не превышает 50 кг/га. Вероятно, это

связано с особенностями видового состава, плотностью растительного покрова, либо спецификой хозяйственного использования данной территории. В целом, по остальным площадкам наблюдается более равномерное распределение запасов углерода между надземной и подземной частями, однако во всех случаях запасы надземного углерода превышают аналогичные показатели для подземной части. Только на площадках ППП №13 и ППП № 14 сопоставимы значения запасов С по обеим фракциям, что может указывать на большую роль корневых систем в формировании органического углерода на данных территориях. На ППП №15 подлесок отсутствует, поэтому там запас углерода не выражен.

Следовательно, результаты исследования демонстрируют значительную пространственную неоднородность распределения запасов углерода в различных частях растительности и указывают на определяющую роль особенностей почвенного, растительного покрова и антропогенного воздействия для аккумуляции органического углерода.

На основании данных, собранных на постоянных пробных площадях карбонового полигона, заложенных в различных типах лес-

ных экосистем, проведена оценка продуктивности подлесочных пород с использованием методики, предложенной А.И. Уткиным и соавторами (2005) 20. Результаты расчетов позволяют судить о характере распределения и величинах запасов углерода в фитомассе представителей подлеска, а также о динамике формирования надземной чистой первичной продукции. Суммарные значения первичной продукции представлены в пересчёте на килограммы углерода на 1 гектар площади, что даёт возможность сопоставлять продуктивность различных пород и пробных площадей.

В таблице 2 отражены запасы углерода в фитомассе подлесочных пород, а также значения надземной и подземной первичной продукции для каждого изученного объекта. Расчётные показатели фитомассы включают отдельные компоненты (стволы и ветви, листья, корни), что позволяет более детально анализировать структурные особенности углеродного баланса подлеска. Приведённые данные демонстрируют существенную неоднородность распределения углерода между древесно-кустарниковыми породами, связанную как с экотипическими особенностями участков, так и с доминирующими видами растений.

Таблица 2

Прирост подлесочных пород на пробных площадях

Table 2

Growth of undergrowth in the test areas

№ППП /Тип леса   PSP No/ type of forest	Виды растений   Types of plants	Первичная продукция фитомассы, кг/га/год   Primary production of phytomass, kg/ha/year					Всего   Total
		Стволы и ветви   Trunks and branches	Листья   Leaves	Корни   Roots	Надземная   Above-ground	Подземная   Below-ground	
3/ B <sub>2</sub>	Малина обыкновенная   Ordinary raspberries	3,88	3,2	2,65	7,08	2,65	9,73
	Всего   Total	3,88	3,2	2,65	7,08	2,65	
6/ C <sub>2</sub> Д	Лещина   Hazel	12,8	25,37	1,74	38,17	1,74	39,91

## Естественные науки и лес

	Клен полевой   Field maple	5,06	2,91	4,61	7,97	4,61	12,58
	Всего   Total	17,86	28,28	6,35	46,14	6,35	52,49
8/лесополоса №76 Каменной степи   8/ forest belt №76 The Stone Steppe	Бересклет   Beresklet	0,613	1,33	0,826	1,94	0,826	2,7
	Ирга круглолистная   Round-leaved irga	2,56	0,69	0,384	3,25	0,384	3,63
	Клен татарский   Tatar maple	7,4	8,4	19,6	15,8	19,6	35,4
	Черемуха   Bird cherry	0,25	0,186	0,906	0,43	0,906	1,34
	Всего   Total	10,82	10,606	21,716	21,15	21,716	42,87
9/лесополоса №124 Каменной степи   9/forest belt №124 The Stone Steppe	Клен полевой   Field maple	0,324	0,086	0,504	0,41	0,504	0,914
	Бересклет   Beresklet	2,68	0,29	0,242	2,96	0,242	3,21
	Всего   Total	3,01	0,376	0,746	3,37	0,746	4,124
10/лесополоса №45 Каменной степи   10/forest belt №76 The Stone Steppe	Бузина красная   Red elderberry	0,4	0,064	1,92	0,104	1,92	2,024
	Бересклет   Beresklet	0,256	0,0896	0,288	0,346	0,288	0,634
	Клен ясенелистный   Ash-leaved maple	17,23	19,11	8,16	36,34	8,16	44,5
	Всего   Total	17,886	19,26	10,368	36,79	10,368	47,16
11/ D <sub>1</sub>	Бересклет   Beresklet	0,70	0,768	0,93	1,47	0,93	2,4
	Рябина обыкновенная   Common mountain ash	21,11	2,19	16,88	23,3	16,88	40,18
	Клен полевой   Field maple	1,17	7,62	0,73	8,79	0,73	9,52
	Клен татарский   Tatar maple	1,58	0,68	1,77	2,26	1,77	4,03
	Роза   Rose	0,746	1,21	0,728	1,95	0,728	2,68
	Боярышник   Hawthorn	9,24	6,55	3,12	15,79	3,12	18,91
	Всего   Total	34,55	19,02	24,16	53,56	24,16	77,72
12/ D <sub>2</sub>	Лещина   Hazel	49,24	130,6	18,67	179,84	18,67	198,51
	Клен полевой   Field maple	3,48	3,72	3,04	7,2	3,04	10,24
	Бузина красная   Red elderberry	0,04	0,013	0,053	0,053	0,053	0,106
	Бересклет   Beresklet	0,835	0,39	0,752	1,22	0,752	1,97
	Всего   Total	53,6	134,72	22,51	188,32	22,51	210,83

## Естественные науки и лес

13/ D <sub>2</sub>	Лещина   Hazel	30,18	24,25	25,61	54,43	25,61	80,04
	Клен полевой   Field maple	8,85	8,43	6,24	17,28	6,24	23,52
	Бересклет   Beresklet	3,6	3,72	4,46	7,32	4,46	11,78
	Всего   Total	42,63	36,4	36,31	79,03	36,31	115,34
14/ C <sub>2</sub> Д	Бересклет   Beresklet	2,09	1,85	1,71	3,94	1,71	5,65
	Бузина красная   Red elderberry	0,188	0,22	0,255	0,408	0,255	0,663
	Лещина   Hazel	4,92	5,08	13,44	10,0	13,44	23,44
	Всего   Total	7,198	7,15	15,405	24,35	15,405	29,75
15/ A <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-
16/ B <sub>3</sub>	Ирга круглолистная   Round-leaved irga	10,88	4,2	7,72	15,08	7,72	22,8
	Малина обыкновенная   Ordinary raspberries	1,86	5,33	1,69	1,16	1,69	8,88
	Рябина обыкновенная   Common mountain ash	19,43	2,92	11,44	22,36	11,44	33,8
	Всего   Total	32,17	12,45	20,85	32,17	20,85	53,02

В результате исследования, проведенного на постоянных пробных площадях различных типов лесных экосистем и лесополос Каменной степи, были выявлены существенные отличия в приросте фитомассы и запасах углерода среди подлесочных пород.

Наиболее высокие показатели надземной первичной продукции зафиксированы для лещины (*Corylus avellana*) на площадке №12 (D<sub>2</sub>), дубрава осоко-снытьевая), где значение составило 179,84 кг/га/год, а общий запас углерода, с учетом подземной (корневой) биомассы, достигает 198,51 кг/га/год. Существенным вкладом также характеризуется лещина на площадке №13 (D<sub>2</sub>) – 54,43 кг/га/год (надземная биомасса) и суммарно 80,04 кг/га/год. Для сравнения, клен полевой (*Acer campestre*) на этих же участках демонстрирует меньшие значения: 7,2 кг/га/год (надземная часть) и 10,24 кг/га/год (суммарно) на площадке №12, и 17,28 кг/га/год и 23,52 кг/га/год — на площадке №13 соответственно.

Рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*), представлена высокими значениями на площадке №11 (D<sub>1</sub>) – 23,3 кг/га/год по надземной фитомассе и 40,18 кг/га/год по суммарному запасу углерода. Аналогично, значительный вклад даёт клен ясенелистный (*Acer negundo*) в лесополосе №45 (ППП №10, Каменная степь) – 36,34 кг/га/год надземной продукции и 44,5 кг/га/год суммарной фитомассы.

В лесополосах Каменной степи (участки 8, 9, 10), концентрация запасов углерода в подлеске существенно ниже. Так, на площадке №9 (лесополоса №124) суммарные значения для всех видов составляют лишь 3,37 кг/га/год по надземной продукции и 4,124 кг/га/год по суммарной фитомассе. На ближайшей к нему площадке №8 (лесополоса №76), наиболее продуктивный вид — клен татарский (*Acer tataricum*), вносит вклад в 15,8 кг/га/год надземной продукции (35,4 кг/га/год суммарно), однако по другим видам значения существенно ниже (например, бересклет — 1,94 и 2,7 кг/га/год соответственно).

В среднем по всем исследуемым площадкам надземная часть фитомассы (стволы, ветви, листья) вносит больший вклад в общий запас углерода по сравнению с подземной. Например, для подлеска участка №11 (D1) надземный запас составил 53,56 кг/га/год, а подземный — 24,16 кг/га/год. В лесополосах, где подлесок менее развит, соотношение надземной и подземной фитомассы выравнивается (например, на №9: 3,37 и 0,746 кг/га/год соответственно).

Анализ распределения углерода между древесными компонентами показывает, что наибольший вклад обеспечивают стволы и ветви. Так, лещина на участке №12 формирует 49,24 кг/га/год углерода в стволах и 130,6 кг/га/год — в ветвях, что в совокупности составляет более 90% всего годового прироста фитомассы этого вида на данной площадке. Напротив, листья и корни суммарно на большинстве объектов формируют менее 15% общего прироста.

По видам, наименее продуктивными оказались такие представители, как бересклет (*Euonymus*) на площадке №9 - с 2,96 кг/га/год по надземной части и 3,21 кг/га/год — суммарно, а также бузина красная (*Sambucus racemosa*) на площадке №10 (0,104 и 2,024 кг/га/год соответственно).

В целом, выявленные различия в показателях прироста подлеска обусловлены как видовыми особенностями, так и типом экосистемы и условиями местообитаний. Естественные дубравы (участки 12, 13) и участки с развитым древесно-кустарниковым ярусом характеризуются наибольшим запасом углерода в подлеске и, соответственно, более высокой первичной продуктивностью.

Таким образом, максимальные значения запасов углерода и первичной продукции подлесочных пород характерны для лещины, кленов и рябины на участках с наибольшей сомкнутостью и видовым разнообразием подлеска (до 198,5 кг/га/год — лещина, участок №12). Минимальные показатели отмечены для лесополос, где суммарная продукция подлеска не превышает 4,1 кг/га/год. Полученные данные свидетельствуют о значимой роли состава подлесочных пород и типа лесной экосистемы в формировании углеродного баланса исследуемых территорий.

Таким образом, можно сделать вывод, что во всех исследуемых лесорастительных условиях прирост надземной фитомассы превышает прирост подземной. Исключение составила ППП №8, заложенная в лесополосе Каменной степи, где оба эти показателя равны, что связано с условиями существования фитоценоза (недостаток влаги, высокие летние температуры). Наибольшая первичная продукция подлесочных пород наблюдается в насаждениях дуба в возрасте более 100 лет в условиях свежей дубравы. Это связано тем, что естественный процесс старения у дубовых насаждений приводит к выпадению части деревьев, усыханию ветвей и, как следствие, появлению окон в пологе, что увеличивает количество света, достигающего нижних ярусов. В результате, подлесочные породы получают больше энергии для фотосинтеза и, следовательно, для производства биомассы.

### **Выводы**

1. Проведённая оценка фракционированных запасов фитомассы подлеска на постоянных пробных площадях карбонового полигона позволяет утверждать, что данный показатель играет значимую роль в определении продуктивности лесных экосистем исследуемого региона. Установлено, что запасы фитомассы на площадках 8, 9 и 10 (Каменная степь, лесополосы №76, 124, 45) колеблются в пределах 0,0069–0,149 т/га, что обусловлено различиями в плотности подлеска. В частности, на пробной площадке №8 при низкой плотности подлеска (800 экз./га) наблюдается минимальный запас фитомассы (0,0069 т/га). Максимальные значения фитомассы зарегистрированы на площадке №10, что связано с доминированием клена ясенелистного (*Acer negundo*), отличающегося пластичностью, быстрым ростом и высокой репродуктивной способностью. В свежей дубраве (ППП №12) зафиксированы наиболее высокие запасы фитомассы (0,777 т/га), при этом вклад лещины обыкновенной (*Corylus avellana*) составляет 0,744 т/га за счёт её высокой экологической пластичности.

2. В результате исследования запасов углерода в фитомассе подлесочных пород на постоянных пробных площадях полигона получены новые

данные, раскрывающие структурно-функциональную организацию лесных сообществ Воронежской области. Максимальные запасы углерода выявлены в дубраве осоко-снытьевского типа (ППП №12) при средней плотности подлеска и составляют 0,357 т/га, аналогичный показатель на ППП №13 достигает 0,172 т/га. Высокие значения углеродных запасов обусловлены совокупностью благоприятных почвенно-климатических условий дубрав, оптимальной плотностью подлеска и присутствием наиболее продуктивных видов. Минимальные запасы углерода отмечены в лесополосе №124 (ППП №9) Каменной степи — 0,0033 т/га, что связано с ограниченным количеством осадков, высокими температурами летом, низким плодородием почв, особенностями формирования лесополос и интенсивной конкуренцией между древостоем и подлеском.

3. Проведённое исследование позволило оценить соотношение запасов углерода между фракциями надземной и подземной фитомассы подлеска. Полученные данные могут быть использованы для формирования регионализированной базы данных углеродных запасов в лесных экосистемах и обоснования природоохранных и лесохозяйственных мероприятий.

4. Анализ соотношения подземной и надземной фитомассы подлесочных пород (индекс R:S) выявил значительные различия в зависимости от типа лесорастительных условий, специфик биологии и экологии видов, структуры насаждений и степени конкуренции за почвенные ресурсы. В пригородных лесничествах показатель R:S варьи-

рует от 0,4 до 4,7, достигая максимальных значений у лещины обыкновенной ( $R:S = 4,7$ ) благодаря мощной корневой системе. В лесополосах Каменной степи соотношение составляет 0,09–1,57 и определяется особенностями почвенного покрова и сомкнутостью полога. Установленная вариативность R:S отражает влияние возраста растений, условий местообитания и антропогенной нагрузки: у молодых особей подлеска R:S выше, что обусловлено необходимостью приоритетного развития корневой системы на ранних стадиях онтогенеза для оптимального усвоения ресурсов.

5. Представленные результаты обладают высокой прикладной значимостью для организации мониторинга и комплексной оценки продуктивности лесных экосистем в различных климатических и почвенных условиях. Полученные данные могут служить научной основой при разработке и реализации лесохозяйственных мероприятий, направленных на поддержание и повышение продуктивности и устойчивости лесных насаждений.

6. Информация о приросте подлесочных пород имеет ключевое значение для количественной оценки углеродного баланса лесостепных экосистем. Детализированные данные о ежегодном приросте и видовом вкладе подлесочных растений позволяют более точно учитывать их роль в процессах секвестрации углерода, что приобретает особую актуальность в условиях глобальных изменений климата, а также при реализации мероприятий по устойчивому управлению лесными ресурсами.

### Список литературы

1. Валентики Р., Замолодчиков Д., Рейер К., Ноги С., Сантини М., Линднер М. Изменение климата в России: прошлое, настоящее и будущее / Леса России и изменение климата. Что нам может сказать наука. -2020. -№ 11. -С. 45-52. <https://doi.org/10.36333/wsctu11>
2. Xu L., Saatchi S.S., Yang Y., Yu Y., Pongratz J., Bloom A.A., et al. Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century. *Sci Adv.* 2021; 7: eabe9829. - DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe9829>.
3. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Hauck J., Olsen A. et al. Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data.* 2020; 12(4): 3269-3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
4. Tagesson T., Guy S., Horion S., Ciais P., Tian F., Brandt M. et al. Recent divergence in the contributions of tropical and boreal forests to the terrestrial carbon sink. *Nature Ecology & Evolution*, 2020; 4(2): 202–209. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1090-0>

5. Mo L., Zohner C.M., Reich P.B., Liang J., De Miguel S., Nabuurs G.-J., et al. Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. *Nature*. 2023; 624: 92-101. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>.
6. Малышева Н.В., Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н., Золина Т.А. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годичного депонирования углерода // *Лесной вестник*. - 2017. -Т. 21. - № 1. С. 4-13. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-4-13
7. Морковина С. С., Панявина Е. А., Шанин И. И., Авдеева И. А. Экономические аспекты организации карбоновых ферм на лесных землях // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. – 2021. – № 1 (52). – С. 17-25. DOI: 10.34220/2308-8877-2021-9-1-17-25
8. Anderson-Teixeira K.J., Herrmann V., Banbury Morgan R., Bond-Lamberty B., Cook-Patton S.C., Ferson A.E. et al. Carbon cycling in mature and regrowth forests globally. *Environ Res Lett*. 2021; 16: 053009. -DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abed01>.
9. Harris N.L., Gibbs D.A., Vaccini A., Birdsey R.A., De Bruin S., Farina M. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat Clim Chang*. 2021; 11: 234-240. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>.
10. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R.A., Fang J., Kauppi P.E. et al. The enduring world forest carbon sink. *Nature*. 2024; 631: 563-569. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>.
11. Zeller L., Pretzsch H. Effect of forest structure on stand productivity in Central European forests depends on developmental stage and tree species diversity. *Forest Ecology and Management*. 2019; 434: 193-204.- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.024>.
12. Yang Y., Luo Y., Finzi A.C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis. *New Phytologist*. 2011; 190: 977-989. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03645.x>.
13. Forest stand structure and functioning: Current knowledge and future challenges. *Ecological Indicators*. 2019; 98: 665-677. -DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.017>.
14. Закамская Е. С., Закамский А. В. Фитомасса подлеска в березняках // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2016. – № 9 (51). – С. 6–9. -DOI 10.18454/IRJ.2016.51.108.
15. Трофимова, И. Л. Надземная фитомасса и ее годичная продукция в спелых сосняках Среднего Урала: специальность 06.03.02. «Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация»: дис. ... канд. с.-х. наук / Ия Леонидовна Трофимова. – Екатеринбург, 2015. – 249 с.
16. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения; УрО РАН. – Екатеринбург, 2007. – 636 с. – ISBN 978-5-7691-2122-7.
17. Usoltsev V.A., Shobairi S.O.R., Chasovskikh V.P. Comparing of allometric models of single-tree biomass intended for airborne laser sensing and terrestrial taxation of carbon pool in the forests of Eurasia. *Natural Resource Modeling*. 2019; 32: e12187. -DOI: <https://doi.org/10.1111/nrm.12187>.
18. Данилов Д.А., Яковлев А.А., Суворов С.А., Крылов И.А., Корчагов С.А., Хамитов Р.С. Формирование надземной фитомассы лиственных древесных пород на постагрогенных землях // *Изв. вузов. Лесн. журн*. 2023. № 1. - С. 65–76. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-65-76>
19. Усольцев В. А., Цепордей И. С., Уразова А. Ф., Борников А. В. Биомасса подлесочных видов Урала и ее аллометрические модели // *Леса России и хоз-во в них*. -2023. -№1 (84). -С. 30–40. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12117>
20. Уткин А. И., Замолодчиков Д. Г., Коровин Г. Н. Определение запасов углерода насаждений на пробных площадях: сравнение аллометрического и конверсионно-объемного методов // *Лесоведение*. – 1997. – № 5. – С. 51-65. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9130857>
21. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Гульбе Я.И., Гульбе Т.А., Милова О.В. Зависимые от фитомассы предикторы надземной части первичной продукции насаждений основных лесобразующих пород России//*Сибирский Экологический Журнал*. - 2005. - № 12. – С.707–715. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9130857>.

### **References**

1. Valentiki R., Zamolodchikov D., Reyer K., Nogi S., Santini M., Lindner M. *Izmenenie klimata v Rossii: proshloe, nastojashhee i budushhee / Lesa Rossii i izmenenie klimata. Chto nam mozhets skazat' nauka* [Climate change in Russia: past, present and future. Forest of Russia and climate change. What can science tell us]. 2020; 11:45-52 (In Russ.) ISSN 2342-9526. <https://doi.org/10.36333/wscu11>
2. Xu L., Saatchi S.S., Yang Y., Yu Y., Pongratz J., Bloom A.A., et al. Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century. *Sci Adv.* 2021; 7: eabe9829. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe9829>.
3. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Hauck J., Olsen A. et al. Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data.* 2020; 12(4): 3269-3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
4. Tagesson T., Guy S., Horion S., Ciais P., Tian F., Brandt M. et al. Recent divergence in the contributions of tropical and boreal forests to the terrestrial carbon sink. *Nature Ecology & Evolution*, 2020; 4(2): 202–209. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1090-0>
5. Mo L., Zohner C.M., Reich P.B., Liang J., De Miguel S., Nabuurs G.-J., et al. Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. *Nature.* 2023; 624: 92-101. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>.
6. Malysheva N.V., Moiseev B.N., Filipchuk A.N., Zolina T.A. *Metody ocenki balansa ugleroda v lesnyh jekosistemah i vozmozhnosti ih ispol'zovaniya dlja raschetov godichnogo deponirovaniya ugleroda* [Methods for assessing carbon balance in forest ecosystems and the possibility of their use for calculating annual carbon deposition] *Lesnoj vestnik= Forest Bulletin.* 2017; 21 (1): 4-13. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-4-13 (In Russ.)
7. Morkovina S. S., Ponyavina E. A., Shanin I. I., Avdeeva I. A. *Jekonomicheskie aspekty organizacii karbonovyh ferm na lesnyh zemljah* [Economic aspects of the organization of carbon farms on forest lands]. *Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika=Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice.* 2021;1 (52):17-25. DOI: 10.34220/2308-8877-2021-9-1-17-25 (In Russ.)
8. Anderson-Teixeira K.J., Herrmann V., Banbury Morgan R., Bond-Lamberty B., Cook-Patton S.C., Ferson A.E. et al. Carbon cycling in mature and regrowth forests globally. *Environ Res Lett.* 2021; 16: 053009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcd01>.
9. Harris N.L., Gibbs D.A., Baccini A., Birdsey R.A., De Bruin S., Farina M. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat Clim Chang.* 2021; 11: 234-240. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>.
10. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R.A., Fang J., Kauppi P.E. et al. The enduring world forest carbon sink. *Nature.* 2024; 631: 563-569. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>.
11. Zeller L., Pretzsch H. Effect of forest structure on stand productivity in Central European forests depends on developmental stage and tree species diversity. *Forest Ecology and Management.* 2019; 434: 193-204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.024>.
12. Yang Y., Luo Y., Finzi A.C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis. *New Phytologist.* 2011; 190: 977-989. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03645.x>.
13. Forest stand structure and functioning: Current knowledge and future challenges. *Ecological Indicators.* 2019; 98: 665-677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.017>.
14. Zakamskaja E.S., Zakamskij A.V. *Fitomassa podleska v bereznjakah* [Phytomass of undergrowth in birch forests]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal =International Research Journal.* 2016; 9 (51):6-9. doi: 10.18454. (In Russ.)
15. Trofimova I.L. *Nadzemnaja fitomassa i ee godichnaja produkcija v spelyh sosnjakah Srednego Urala.* Dis. kand. s.-h. nauk [Elevated phytomass and its annual production in ripe pine forests of the Middle Urals: PhD thesis]. Ekaterinburg, 2015. 249 p. (In Russ.)
16. Usol'cev V.A. *Biological productivity of forests of Northern Eurasia: methods, database and its applications.* Ekaterinburg: UrO RAN, 2007. 636 p. ISBN 978-5-7691-2122-7. (In Russ.)

17. Usoltsev V.A., Shobairi S.O.R., Chasovskikh V.P. Comparing of allometric models of single-tree biomass intended for airborne laser sensing and terrestrial taxation of carbon pool in the forests of Eurasia. *Natural Resource Modeling*. 2019; 32: e12187. DOI: <https://doi.org/10.1111/nrm.12187>.

18. Danilov D.A., Yakovlev A.A., Suvorov S.A., Krylov I.A., Korchagov S.A., Khamitov R.S. *Formirovanie nadzemnoj fitomassy listvennyh drevesnyh porod na postagrogennyh zemljah* [Formation of aboveground phytomass of deciduous tree species on postagrogenic lands]. *Izv. vuzov. Lesn. Zhurnal = Izvestiya vuzov Lesnoy zhurnal*. 2023; 1: 65-76. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-65-76>(In Russ.)

19. Usoltsev V.A., Tsepordey I. S., Urazova A. F., Bornikov A. V. Biomassa podlesochnykh vidov Urala i ee allometricheskie modeli [Biomass of undergrowth species of the Urals and its allometric models]. *Lesn Rossii i khoz-vo v nikh = Forests of Russia and their Economy*. 2023; 1(84): 30-40. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12117> (In Russ.)

20. Utkin A. I., Zamolodchikov D.G., Korovin G.N. *Opredelenie zapasov ugleroda nasazhdenij na probnyh ploshhadjah: sravnenie allometricheskogo i konversionno-obemnogo metodov* [Determination of carbon reserves of plantings on trial areas: comparison of allometric and conversion-volumetric methods]. *Lesovedenie = Forestry science*. 1997; 5: 51-65. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9130857> (In Russ.)

21. Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gul'be Ya.I., Gul'be T.A., Milova O.V. *Zavisimye ot fitomassy prediktory nadzemnoj chasti pervichnoy produktsii nasazhdeniy osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Rossii* [Phytomass-Dependent Predictors of Above-Ground Net Primary Production of Plantations of the Main Forest-Forming Species of Russia]. *Sibirskiy Ekologicheskij Zhurnal = Siberian Journal of Ecology*. 2005; 12: 707-715. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9130857>.

### **Сведения об авторе**

✉ *Карташова Нелли Павловна* - кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2535-9557>, e-mail: [Kartashova\\_73@mail.ru](mailto:Kartashova_73@mail.ru)

### **Information about the author**

✉ *Nelli P. Kartashova* – Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Forest Crops, Departments of Landscape Architecture and Soil Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2535-9557>, e-mail: [Kartashova\\_73@mail.ru](mailto:Kartashova_73@mail.ru)

✉ - Для контактов/Corresponding