

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/15>

УДК 630*181.5:630*231:630*561.24



Фракционный состав фитомассы и годовичная продукция сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в условиях сухостепной зоны каштановых почв

Юстина Н. Поташкина¹✉, potashkina-y@vfanc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8846-2354>

Александр В. Кошелев¹, koshelev_av@vfanc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4048-7549>

Варвара А. Веденева¹, vedeneeva-v@vfanc.ru <https://orcid.org/0000-0002-6623-6062>

Мария О. Шатровская¹, shatrovskayam@vfanc.ru <https://orcid.org/0000-0002-3202-4184>

¹ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация

Увеличение запасов фитомассы в степных зонах может осуществляться путем проведения агролесомелиоративных мероприятий, а именно созданием искусственных защитных лесных насаждений (ЗЛН). Искусственно созданные защитные лесные насаждения выполняют важные функции в сухостепных районах, включая почвозащитную, средообразующую, водоохранную и санитарно-гигиеническую. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) активно используется для закрепления песков, предотвращения опустынивания и восстановления деградированных земель. Кроме того, она является эффективным поглотителем углерода, фиксируя до 2,4 т CO₂ в год, повышая при этом устойчивость экосистем к климатическим изменениям. Цель настоящей работы – оценка запасов фитомассы и годичной продукции искусственно созданных насаждений *Pinus sylvestris* в условиях сухостепной зоны каштановых почв с учетом возрастной динамики древостоя. Основным методом расчёта являлось аллометрическое моделирование на основе таксационных данных, полученных в результате проведения сплошной перечислительной таксации на 10 заложенных пробных площадях. Запасы фитомассы рассчитывались для фракций ствола с корой (Pst), скелета ветвей (Pbr), хвои (Pf), корней (Pr). Результаты показали, что запасы фитомассы варьируют от 29,2 т/га у молодняка 1 группы до 120,3 т/га у спелых насаждений. Доминирующей фракцией в структуре фитомассы является ствол с корой (Pbr) на долю которой приходится от 51,7 до 59,6%. Величина годичной продукции сильно зависит от возраста деревьев. Отмечено постепенное увеличение от молодняка к спелым древостоям, достигая максимальных значений при оптимальном балансе роста и физиологической устойчивости у средневозрастных насаждений и составили 3 т/га/год, минимальные значения фиксируются у молодняка 1 группы составляя 1,26 т/га/год. Полученные данные о запасах фитомассы в искусственных сосновых насаждениях могут использоваться для планирования агролесомелиоративных мероприятий и оценки их вклада в поглощение парниковых газов при разработке проектов по адаптации к изменению климата.

Ключевые слова: запас фитомассы, сухостепная зона, годовичная продукция, *Pinus sylvestris*, защитные лесные насаждения, таксационные характеристики

Финансирование: Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме НИР 125021302094-5 «Формирование и функционирование адаптивных агролесомелиоративных комплексов юга России в условиях климатических изменений с использованием цифровых технологий»

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

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Фракционный состав фитомассы и годовая продукция сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в условиях сухостепной зоны каштановых почв / Ю.Н. Поташкина, А.В. Кошелев, В.А. Веденева, М.О. Шатровская // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 256-275. – Библиогр.: с. 269-274 (30 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/15>

Поступила 15.09.2025. *Пересмотрена* 25.10.2025. *Принята* 30.11.2025. *Опубликована онлайн* 26.12.2025.

Article

Fractional composition of phytomass and annual production of Scots pine (*Pinus sylvestris*) under the conditions of the dry steppe zone of chestnut soils

Yustina N. Potashkina¹✉, potashkina-y@vfanc.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8846-2354>

Aleksandr V. Koshelev¹, koshelev_av@vfanc.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-4048-7549>

Varvara A. Vedeneva¹, vedeneva-v@vfanc.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6623-6062>

Mariya O. Shatrovskaya¹, shatrovskayam@vfanc.ru  <https://orcid.org/0000-0002-3202-4184>

¹*Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetskij avenue, Volgograd, 400062, Russian Federation*

Abstract

Increasing phytomass stocks in steppe zones can be achieved through agroforestry reclamation measures, specifically by establishing artificial protective forest plantations (PFPs). Artificially created protective forest plantations perform important functions in dry-steppe regions, including soil protection, environmental regulation, water conservation, and sanitary-hygienic roles. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is widely used for sand stabilization, preventing desertification, and restoring degraded lands. In addition, it is an effective carbon sink, sequestering up to 2.4 t of CO₂ per year, thereby enhancing ecosystem resilience to climate change. The aim of this study was to assess the phytomass stocks and annual production of artificially established *Pinus sylvestris* plantations in the dry-steppe zone of chestnut soils, taking into account the age dynamics of the stand. The primary calculation method was allometric modelling based on forest inventory data obtained from a complete enumeration survey conducted on 10 sample plots. Phytomass stocks were calculated for the following fractions: stem with bark (Pst), branch skeleton (Pbr), needles (Pf), and roots (Pr). The results showed that phytomass stocks ranged from 29.2 t/ha in young stands of age group I to 120.3 t/ha in mature stands. The dominant fraction in the phytomass structure is the stem with bark (Pst), accounting for 51.7–59.6% of the total. Annual production strongly depends on tree age. A gradual increase from young to mature stands was observed, reaching maximum values at an optimal balance between growth and physiological stability in middle-aged stands (3 t/ha/year), while the minimum values were recorded in age group I young stands (1.26 t/ha/year). The obtained data on phytomass stocks in artificial pine plantations can be used for planning agroforestry reclamation measures and assessing their contribution to greenhouse gas sequestration in the development of climate adaptation projects.

Keywords: *phytomass stocks, dry-steppe zone, annual production, Pinus sylvestris, shelterbelt plantations, stand characteristics*

Funding: The work was carried out within the framework of the State assignment on the topic of research 125021302094-5 "Formation and functioning of adaptive agroforestry complexes in the south of Russia in the context of climate change using digital technologies"

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

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

For citation: Potashkina Yu. N., Koshelev A. V., Vedeneyeva V. A., Shatrovskaya M. O. (2025). Fractional composition of phytomass and annual production of Scots pine (*Pinus sylvestris*) under the conditions of the dry steppe zone of chestnut soils. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 256-275 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/15>.

Received 15.09.2025. **Revised** 25.10.2025.

Введение

Дифференциация запасов фитомассы обуславливается различными группами факторов, такими как абиотические (почвенно-климатические, орографические), биотические и антропогенные. Для регионов России отмечается четко выраженное зональное распределение в соответствии с климатическими условиями: величина фитомассы увеличивается с севера на юг, с некоторым уменьшением в аридных зонах. Наибольшие запасы фитомассы сосредоточены в лесных сообществах, по оценкам авторов запасы фитомассы в различных типах леса варьируют от 70 т/га до 450 т/га. Наименьшие фиксируются в степной и полупустынной природных зонах. В степной зоне фитомасса формируется за счет подземных и надземных частей однолетних и многолетних трав [1, 2]. По оценкам авторов усредненный максимальный запас травянистого яруса надземной зеленой фитомассы варьирует в пределах от 70 г/м² в опустыненных до 310 г/м² в луговых степях. Запасы подземной фитомассы слабо отличаются в зависимости от типа степей и составляют 800-1400 г/м² [2].

Увеличение запасов фитомассы в степных зонах может осуществляться путем проведения агролесомелиоративных мероприятий, а именно созданием защитных лесных насаждений (ЗЛН) [3]. Искусственно созданные защитные лесные насаждения выполняют ряд важнейших функций в сухостепных районах, среди которых средообразующая, водоохранная, санитарно-гигиеническая [4]. В условиях территорий с малым процентом лесистости расширяется функциональное значение защитных лесных насаждений, они рассматриваются также с позиции поглотителей климатически активных газов. Отдельно стоит отметить использование массивных

Accepted 30.11.2025. **Published online** 26.12.2025.

насаждений на песках с целью стабилизации подвижных сыпучих (незакрепленных) песков. Для данных видов работ в степной и лесостепной зонах используется *Pinus sylvestris*, отличающиеся развитой корневой системой, которая эффективно закрепляет песчаные грунты [5]. Помимо этого, сосна по данным Рослесинфорга обладает наиболее интенсивной поглощающей способностью среди хвойных древесных пород, так количество аккумулированного CO₂ достигает до 2,4 тонн в год/га [6].

Фитомасса древесных растений является следствием поглощения и трансформации углекислого газа из атмосферы, по средствам фотосинтеза. Фитомасса выступает одним из ключевых звеньев в углеродном цикле экосистем в следствие чего важным является проведения исследований по оценки запасов фитомассы древостоя в различных природных зонах. Корректная оценка фитомассы и годичной продукции необходима для получения объективных количественных показателей депонирования углерода искусственными насаждениями и последующего анализа их экологической эффективности [7, 8, 9, 10].

Если запас фитомассы рассматривается, как статическая величина и характеризует то, что накоплено к текущему моменту, то годичная продукция является динамической величиной и показывает сколько прибавилось за год. У этих двух понятий может отмечаться прямая взаимосвязь, заключающаяся в следующем: чем больше запас фитомассы, тем выше может быть абсолютная годичная продукция, так как формируется больше фотосинтезирующей поверхности, однако эта зависимость не является линейной и на определенном этапе роста продукция начинает снижаться [11, 12]. Так согласно закону убывающей

продуктивности следует, что на ранних стадиях развития древостоя (молодняки) годовичная продукция растёт вместе с фитомассой. В зрелом и перестойном возрасте, несмотря на большой запас фитомассы, прирост снижается — из-за затенения, изреженности и старения деревьев. Так, сначала продукция растёт с запасом, достигает максимума, затем падает. Это отражает динамику роста леса и используется в моделях продуктивности лесных экосистем [13, 14, 15]. Цель работы – оценка запасов фитомассы и годовичной продукции искусственно созданных насаждений (*Pinus sylvestris* L.) в условиях сухостепной зоны каштановых почв с учетом возрастной динамики древостоя. Выбор *Pinus sylvestris*, как объекта исследования обуславливается выраженной засухоустойчивостью и активным использованием в лесомелиоративных работах. Высокая продуктивность в стрессовых условиях дополнительно подтверждает её пригодность для исследований в сухостепной зоне.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Данная работа является эмпирическим исследованием. Объектом исследования выступает древостой сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в сухостепной зоне каштановых почв. Предметом исследования являются количественные показатели фитомассы по фракциям (ствол с корой, скелетные ветви, хвоя и корни) и годовичная продукция (годовичный прирост биомассы), а также закономерности их изменения в различных возрастных классах.

Сбор данных

Исследования проводились на территории Нижневолжской станции по селекции древесных пород – филиале ФНЦ агроэкологии РАН, расположенного в Камышинском районе Волгоградской области (бывший агролесомелиоративный пункт ВНИАЛМИ). История создания пункта берет свое начало с 1894 году, в задачи которого входило выполнение работ по облесению и закреплению оврагов и проведение научно-исследовательских работ по защитному лесоразведению. В этом же году начинаются масштабные работы по облесению и закреплению песков путем посадки шелуги, позднее в 1898 г

междурядьях шелуги высаживалась сосна обыкновенная. В 1902 г. участок, на котором расположен Камышинский лесомелиоративный опорный пункт, был избран песчано-овражной организацией лесного департамента в качестве одного из первых объектов укрепительных и облесительных работ на Юго-Востоке. С расширением работ по защитному лесоразведению площадь этого дендрологического участка постепенно увеличивалась. С 1990 года опорный пункт превратился в Нижневолжскую станцию по селекции древесных пород. К текущему моменту площадь сосновых насаждений составляет 100,1 га. В 2022 году на территории станции в рамках работы по Важнейшему инновационному проекту «Углерод» организован полигон интенсивного уровня типа 2 «Камышин» [5, 6].

Объект расположен в центральной части Волгоградской области в сухостепной зоне на западном берегу Волги (Волгоградского водохранилища) в пределах восточного крутого склона Приволжской возвышенности, изрезанной долиной реки Камышинки и оврагами. Поверхность территории пологоволнистая, абсолютные отметки поверхности изменяются от 85 до 140 м. Формирование рельефа возвышенности происходило под воздействием интенсивного проявления новейших тектонических поднятий и эрозийных процессов. Камышинский район относится к ступенчатым возвышенностям правобережья Волги, расположенным между реками Иловлей и Волгой. Типы почв – светло-каштановые почвы засушливых полупустынных степей. Почвообразующие породы этих почв отличаются значительным разнообразием: лесовидные суглинки, песчаники, мел, мергель, опока, древние отложения Хвалынского моря, Сыртовые глины. Это в свою очередь нашло отражение в разнообразии самих почв. По гранулометрическому составу каштановые почвы делятся: глинистые и тяжелосуглинистые (примерно 5%), среднесуглинистые (примерно 18%), легкосуглинистые (примерно 67%), супеси и песчаные (примерно 10%). По мощности гумусового горизонта они делятся на среднесплошные и маломощные, но преобладающей является

разновидность маломощных. Климат района характеризуется резкой континентальностью. Среднее годовое количество осадков составляет 330 мм. В период вегетации выпадает 30% осадков от среднегодовой нормы. Абсолютный минимум температуры воздуха минус 36°C, а абсолютный максимум плюс 42,6°C. Летом испарение превышает сумму осадков почти в 3 раза. В весенний период свирепствуют суховейные ветры юго-восточного и южного направлений. Наибольшее число суховейных дней приходится на май, июнь, июль. Нередко в течение месяца число суховейных дней достигает 20. Отмечаются дни, когда относительная влажность воздуха спускается до 10%.

Сбор первичного материала для определения запасов фитомассы осуществлялся на 10 заложённых пробных площадях тестового полигона размером 50×50 м в соответствии с методическими рекомендациями (рисунок 1). Из-за мозаичного характера защитных лесных насаждений, сформированных в разные годы, в пределах каждой площадки одновременно присутствовали участки, представленные деревьями различных возрастных групп. Возрастная структура определялась на основе сплошной перечислительной таксации внутри ПП, что позволило включить в анализ весь спектр возрастных состояний и обеспечить достаточную репрезентативность данных при оценке фитомассы и годичной продукции. Определение возраста осуществлялось с применением бурава Пресслера, измерение диаметра ствола лесной мерной вилкой, высота насаждений измерялась высотомером [16, 17].

Анализ данных

Расчет запасов фитомассы осуществлялся аллометрическим методом, основу которого представляет традиционная трансконтинентальная аллометрическая модель с константами уравнений, в качестве регрессоров выступают высота и диаметр насаждения по формуле (1) [18]

$$\ln P = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_{HВ}$$

где P – фитомасса по фракциям, кг; H – высота дерева, м; $D_{HВ}$ – диаметр ствола на высоте 1,3 м (см).

Коэффициенты a_0 , a_1 , a_2 уравнения (1) были взяты из ранее опубликованных аллометрических моделей для *Pinus*, рассчитанных на широком ареале [18–21], поскольку отсутствуют данные модели для сухостепных условий.

Прямой валидации используемой аллометрической модели на данных пробных деревьев исследуемой территории в рамках настоящего исследования к текущему моменту не проводилось. В дальнейшем планируется проведение валидации моделей на основе спила модельных деревьев с каждой пробной площадки с последующим расчётом показателей точности (RSE , R^2), что позволит уточнить достоверность полученных оценок фитомассы и годичной продукции. Фитомасса определялась для следующих фракций древостоя: ствол с корой (Pst), скелет ветвей (Pbr), фотосинтезирующие органы (хвоя) (Pf), и корни (Pr).

Для определения годичной продукции был отобран растительный материал с пробных деревьев. Годичная продукция хвои определялась путем разделения побегов и хвои на приростные годовые сечения с последующим высушиванием до постоянной массы и взвешиванием. Полученные данные использовались для расчёта годичной продукции по каждой возрастной группе и экстраполяции на гектар [16].

Сочетание прямых измерений и использование уравнения позволяет произвести точный расчет и учесть региональные особенности годичного прироста хвои древесных растений. Используя трансконтинентальные аллометрические модели фракционной структуры фитомассы дают возможность оперативно определять фитомассу на единице площади, используя лишь данные сплошного перечёта деревьев по ступеням толщины [18, 19, 20, 21].

Для анализа полученных данных использовались методы описательной и многомерной статистики. Для выявления сходства и различий между исследуемыми объектами дополнительно был проведён кластерный анализ, что позволило выделить группы с близкими статистическими параметрами и установить закономерности в распределении признаков.

Кластерный анализ был использован в качестве дополнительного инструмента для проверки структурной однородности древостоев и выявления

скрытых группировок в данных, не основанных напрямую на принятых возрастных категориях.

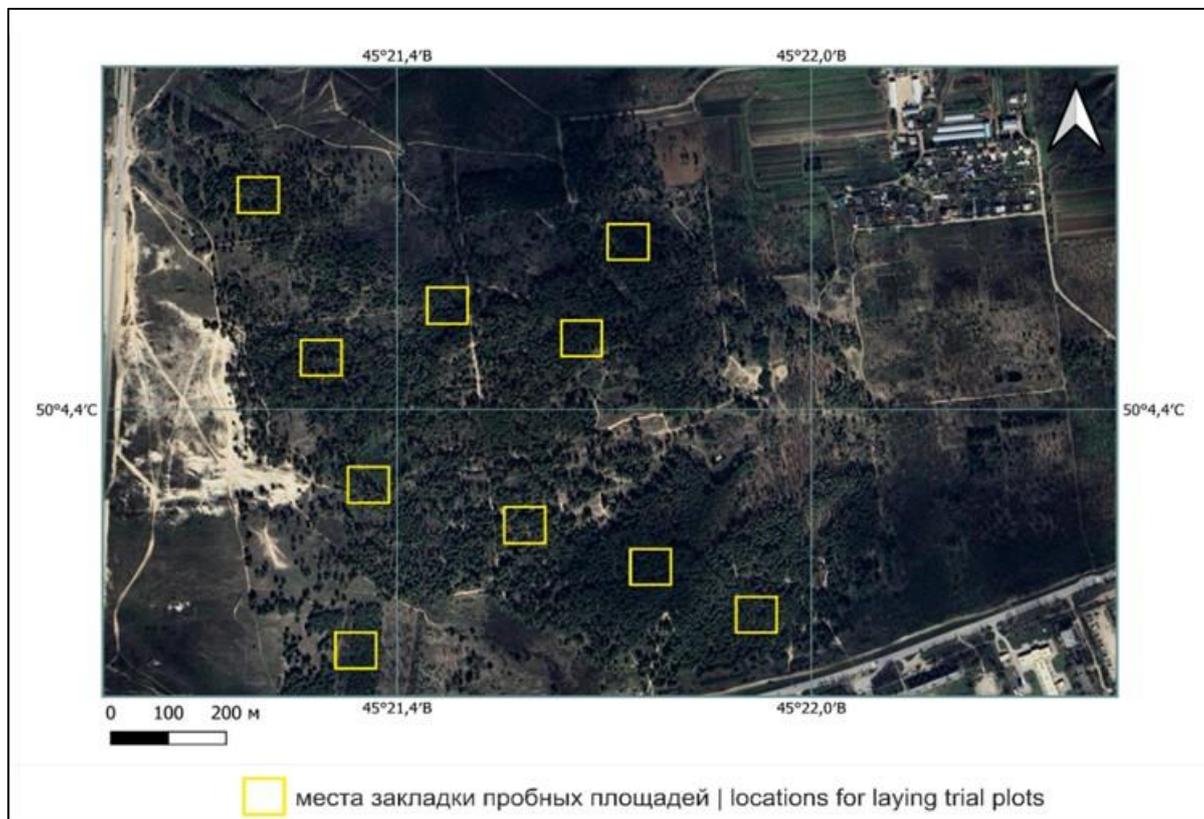


Рисунок 1. Расположение пробных площадей на тестовом полигоне

Figure 1. Location of test areas on the test site

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Статистическая обработка данных и кластерный анализ проводились с использованием языка программирования Python (библиотеки pandas, scikit-learn, scipy, matplotlib, seaborn) и программы Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

В условиях сухостепных зон, подвергшихся агролесоремелиоративному обустройству, наибольший запас фитомассы сконцентрирован в искусственно созданных лесных насаждениях [3, 4]. В процессе проведения работ были обследованы

ЗЛН на 10 заложенных пробных площадях. Отмечены следующие особенности возрастной структуру древостоя: на территории зафиксировано наличие различных возрастных классов насаждений (*Pinus sylvestris* L.) от молодняков до спелых, максимальный возраст которых достигает 101 год. На ряде пробных площадей, расположенных в северо-

западной части исследуемого участка, отмечается обильное наличие подроста, густота которого достигает 18 тыс.шт/га. Ярус живого напочвенного покрова характеризуется выраженной пространственной неоднородностью, что

проявляется в варьировании его проективного покрытия, запаса и видового состава на различных участках исследуемой территории. В структуре фитоценоза отмечено следующее: на пробных площадях с большим количеством подроста зафиксировано малое количество живого напочвенного покрова и напротив на участках с обильным живым напочвенным покровом малое количество подроста, что обуславливается рядом факторов. Так, густой подрост формирует плотный подполг, снижающий уровень освещённости и изменяющий микроклиматические условия на уровне почвы. Это ограничивает развитие живого напочвенного покрова, особенно светолюбивых видов трав. В то же время, обильный травянистый покров может препятствовать прорастанию и укоренению древесных всходов, создавая конкуренцию за ресурсы и физически ограничивая пространство. На пробных площадях, расположенных преимущественно по краям лесного массива обнаружены крупные древесные остатки

(КДО), что свидетельствует о воздействии экстремальных метеорологических факторов, таких как сильные ветровалы [5, 22].

Вертикальная структура фитоценоза включает древесный ярус, ярус подроста, подлеска и живой напочвенный покров. Доминантом в структуре фитоценоза является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris L.*), формирующая полог древостоя. Так же встречается дуб черешчатый (*Quercus robur*), тополь дрожащий (*Populus tremula*), робиния псевдоакация (*Robinia pseudoacacia*). Зафиксирован обильный подрост сосны, густота которого колеблется в пределах от 5,1 до 18 тыс. шт./га. К подросту относили насаждения возрастом до 5 лет, средняя высота которых составляет 1,5-2 м. Отмечено наличие древостоя различных возрастных классов для хвойных (молодняки, средневозрастные, приспевающие, спелые), таксационные характеристики древостоя различных возрастных групп приведены в таблицах 1,2.

Таблица 1

Морфометрические характеристики древостоя

Table 1

Morphometric characteristics of tree stands

Возрастные группы хвойных деревьев Age groups of coniferous trees	Возраст древостоя лет Age of tree stand, y ears	Высота, м Height, m	Диаметр, см Diameter, cm	Запас, м ³ /га Growing stock, m ³ ha ⁻¹	Класс бонитета Capacity class	Густота, шт/га Density, pcs/ha
Молодняки (1-я группа) Young stands, (group 1)	15-20	6,9±0,7	14,5±2,5	80,1	IV	800
Молодняки (2-я группа) Young stands, (group 2)	20-40	10,8±1,1	21,8±3,1	201,5	III	500
Средневозрастные (3-я группа) Middle-aged stands (group 3)	40-60	14,1±0,5	28,6±5,8	362,3	III	400
Приспевающие (4-я группа) Maturing stands (group 4)	60-80	17,5±1,2	32,9±2,9	446,3	III	300
Спелые (5-я группа) Mature stands (group 5)	80-100	20,6±1	40,3±4,3	525,5	III	200

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Статистические характеристики Statistical parameters	Молодняки (1-я группа) Young stands, (group 1)		Молодняки (2-я группа) Young stands, (group 2)		Средневозрастные (3-я группа) Middle-aged stands		Приспевающие (4-я группа) Maturing stands		Спелые (5-я группа) Mature stands	
	h	d	h	d	h	d	h	d	h	d
Размер выборки, шт. Sample size, pcs.	54	54	51	51	35	35	44	44	30	30
Минимум Minimum	5,1	9,5	8,6	18	12	18	15,9	29,8	18,1	35
Максимум Maximum	9,1	18	13	26,5	15	35	21,3	40	22,2	47
Мода Moda	6,9	12,5 15,8	9,6	18	14,5	28,5	17,3	31,4	19,9	39
Медиана Median	6,9	14,1	10,7	20	14,2	29	17,3	32	20,4	39,7
Среднее Mean	7	14,1	10,7	21,6	14	28,3	17,5	32,9	20,6	40
Нижний квартиль (Q1) Lower quartile (Q1)	6,4	12,5	9,85	18	13,8	27,2	16,9	31,4	19,9	37,3
Верхний квартиль (Q3) Upper quartile (Q3)	7,5	15,6	11,5	26,5	14,5	30,5	18	34	21,4	42,5
Межквартильный размах Interquartile range	1,1	3,1	1,65	8,5	0,7	3,3	1,1	2,6	1,5	5,2
Стандартное отклонение Standard deviation	1,7	2	1,09	3,6	0,6	2,8	1	2,2	0,9	2,8
Коэффициент вариации Coefficient of variation	11,1	14,1	10,1	17	4,3	10	5,8	6,6	4,5	7
Стандартная ошибка Standard error	0,10 5	0,27	0,15	0,51	0,10	0,48	0,15	0,33	0,17	0,52
Дисперсия выборки Sample variance	0,59	3,96	1,18	13,4	0,37	8,13	1,04	4,74	0,89	7,97
Асимметрия Asymmetry	0,33	0,78	0,03	0,12	-0,78	-0,87	0,84	1,33	-0,24	0,46
Экцесс Excess	0,42	0,65	-0,35	-1,26	0,25	0,58	0,65	1,95	-0,71	-0,29

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Ярус подлеска слабо развит и сформирован караганой древовидной (*Caragana arborescens*), сиренью обыкновенной (*Syringa vulgaris*), смородиной золотистой (*Ribes aureum*), раkitником

русским (*Chamaecytisus ruthenicus*). Доминантами живого напочвенного покрова являются следующие виды травянистых растений: Полынь австрийская (*Artemisia austriaca*), Вейник наземный

(*Calamagrostis epigeios*), Синеголовник полевой (*Eryngium campestre*), Мятлик узколистый (*Poa angustifolia*), Мятлик луговой (*Poa pratensis*), Латук татарский (*Lactuca tatarica*), Житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum*), Тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium*), Ковыль Лессинга (*Stipa lessingiana*), Овсяница валлиская (*Festuca valesiaca*).

На основании полученных данных по высоте и диаметру деревьев был выполнен кластерный анализ (рисунок 2) с помощью алгоритма KMeans ($k=3$), позволивший выделить структурно однородные группы насаждений. В качестве входных переменных использовались таксационные параметры — высота и диаметр. Перед кластеризацией данные были стандартизованы (z -преобразование) с целью устранения масштабных различий между переменными.

Оптимальное количество кластеров определялось с применением метода локтя, основанного на графическом анализе зависимости внутрикластерной суммы квадратов от числа кластеров. По результатам данного анализа было выбрано значение $k = 3$, обеспечивающее достаточную дифференциацию групп при минимальных потерях внутригрупповой однородности.

В результате кластеризации были выделены три статистически различающиеся группы объектов (кластер 0, кластер 1, кластер 2), характеризующиеся различными средними значениями высоты и диаметра. Так, к кластеру 0 — отнесены насаждения с самыми большими значениями, центр кластера имеет следующие значения: высота 20,08 диаметр 38,99 в исходных единицах. К кластеру 1 отнесены насаждения с минимальными значениями, имеющимся в массиве данных, центр кластера: высота 8,15 диаметр, 15,8 в исходных единицах. Кластер 2 — это средние значения по массиву данных, центр которых отмечен в значениях 14,67 по высоте и 29,1 по диаметру в исходных единицах. Полученные кластеры интерпретируются как условные типы деревьев, отличающиеся морфометрическими характеристиками.

Следует отметить, что результаты кластерного анализа ($k = 3$), определённые методом “локтя”, не полностью совпадают с выделенными возрастными группами ($n = 5$). Это объясняется тем, что многомерная кластеризация группирует древостои не по формальным возрастным категориям, а по фактическому сходству совокупности таксационных параметров и биомассовых характеристик. В рамках кластеров 1 и 2 объединяются соответственно молодняки I–II групп и средневозрастные древостои, которые демонстрируют близкие структурные показатели. Третий кластер представлен приспевающими и спелыми насаждениями, отличающимися более высокими значениями запаса фитомассы и годичной продукции. Таким образом, кластеризация выявила укрупнённые структурные паттерны, подтверждающие, что пять возрастных классов фактически формируют три функционально сходных группы, что усиливает интерпретацию возрастной динамики

Таксационные данные послужили основой для проведения расчетов запасов фитомассы и годичной продукции для древостоя *Pinus sylvestris* различных возрастных классов (таблица 3, рисунок 3).

Так, согласно полученным расчетам, отмечается увеличение фитомассы одного дерева с увеличением возраста древостоя от 36,5 кг у молодняков 1 группы до 601,5 кг у спелых насаждений. В пересчете на гектар, не смотря на снижение густоты древостоя, наблюдается схожая ситуация, фитомасса увеличивается от 29,2 т/га до 120,3 т/га.

При этом на группу спелых насаждений приходится максимальное значение запаса фитомассы, что является следствием накопления органического вещества фитомассы не смотря на уменьшение густоты. Полученные значения запасов фитомассы для спелых насаждений (120,3 т/га) находятся в пределах, характерных для сосновых культур сухостепной зоны, однако заметно ниже, чем максимальные показатели, отмечаемые в более благоприятных условиях произрастания. По данным исследований, в южнотаёжных и лесостепных регионах, где сосна растёт при более высоком

увлажнении и на глубоких суглинистых почвах, запасы фитомассы спелых древостоев могут достигать 150–200 т/га, а в отдельных высокопродуктивных участках — до 220–250 т/га. Таким образом, различие почти в 1,5–2 раза по сравнению с оптимальными условиями подчёркивает выраженное влияние аридного климата, песчаных почв и ограниченного водного режима на продуктивность сосновых насаждений в сухостепной зоне. Полученные результаты отражают характерный для засушливых экосистем сдерживающий эффект дефицита влаги на накопление биомассы, даже при достижении насаждениями спелого возраста.

В структуре фитомассы на всех этапах онтогенеза доминировала фракция ствола с корой (Pst), доля которой увеличивалась с возрастом от 51,7 до 59,6%. Доля скелетных ветвей (Pbr), хвои (Pf) и корней (Pr) демонстрировала умеренное снижение или стабилизацию в относительном выражении, при устойчивом росте абсолютных значений. Особенно отчётливо это наблюдалось в группах зрелых и приспевающих насаждений. Запас фитомассы в фракции корни стабильно составляет порядка 19–23% с незначительным ростом в спелых древостоях. На графике (рисунке 3) отмечается увеличение запаса фитомассы с возрастом, особенно ярко это выражено в фракции ствол с корой и корни, фракция хвои достигает плато и почти не увеличивается после достижения среднего возраста древостоя [23, 24].

Отмечается перераспределение фитомассы в сторону фракций ствол с корой и корни в связи с старением древостоя, что указывает на переход от роста к накоплению устойчивой биомассы. Относительная доля хвои и ветвей уменьшается, несмотря на рост их абсолютных запасов. Оптимальная плотность для суммарного накопления массы наблюдается в средневозрастных и приспевающих насаждениях

Таким образом, структура фитомассы отражает переход от активного роста к стабилизации накопленных органических ресурсов, с доминированием стволовой фракции у более зрелых деревьев. Уменьшение плотности древостоя компенсируется ростом массы отдельных деревьев, обеспечивая общее увеличение запаса на гектар. У приспевающих древостоев наблюдается умеренное снижение до 2,24 т/га, что может быть связано с началом процессов старения, уменьшением прироста в высоту и перераспределением ресурсов на поддержание физиологической устойчивости. Отмечено различия между индивидуальной продукцией деревьев и продукцией насаждения в целом, что обусловлено изменением густоты древостоя по мере его развития. Несмотря на то, что спелые насаждения характеризуются максимальной годичной продукцией на одно дерево (14,4 кг/дер.), их суммарная продукция на гектар составляет 2,88 т/га/год, что ниже, чем у средневозрастных насаждений (3,0 т/га/год при индивидуальной продукции 7,74 кг/дер.).

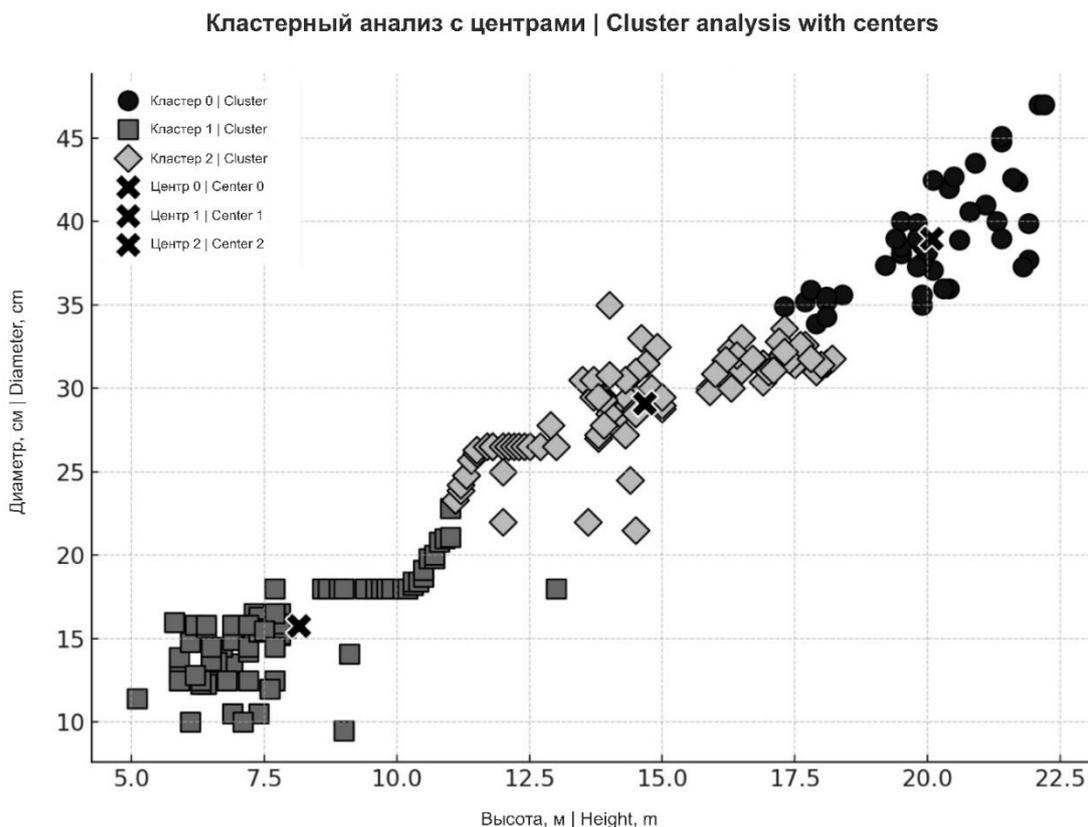


Рисунок 2. Результаты кластерного анализа по таксационным показателям

Figure 2. Results of cluster analysis for taxation indicators

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 3

Фракционная структура фитомассы и годовичная продукция древостоя различных возрастных классов

Table 3

Fractional structure of phytomass and annual production of forest stands of different age classes

Возрастные группы древостоя Age classes of forest stands	Запас фитомассы по фракциям Phytomass reserves by fractions								Годичная продукция	
	Pst		Pbr		Pf		Pr			
	на дерево, кг for each tree, kg	на га, т per ha, t	на дерево, кг for each tree, kg	на га, т per ha, t	на дерево, кг for each tree, kg	на га, т per ha, t	на дерево, кг for each tree, kg	на га, т per ha, t	на дерево, кг for each tree, kg	на га, т per ha, t
Молодняки (1-я группа) Young stands, (group 1)	18,9	15,1	6,1	4,9	4,5	3,6	7	5,6	1,57	1,26
Молодняки (2-я группа) Young stands, (group 2)	64,5	32,3	17,4	8,7	10,2	5,1	24,4	12,2	4,08	2,04

Средневозрастные (3-я группа) Middle-aged stands (group 3)	132,5	53	32,8	13,1	17,2	6,9	50,6	20,3	7,74	3
Приспевающие (4-я группа) Maturing stands (group 4)	216,9	65	44,7	13,4	21,3	6,4	81,3	24,4	7,45	2,24
Спелые (5-я группа) Mature stands (group 5)	358,6	71,7	73,5	14,7	32	6,4	137,4	27,5	14,4	2,88

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Распределение фитомассы по фракциям (на гектар) | Distribution of phytomass by fractions (per hectare)

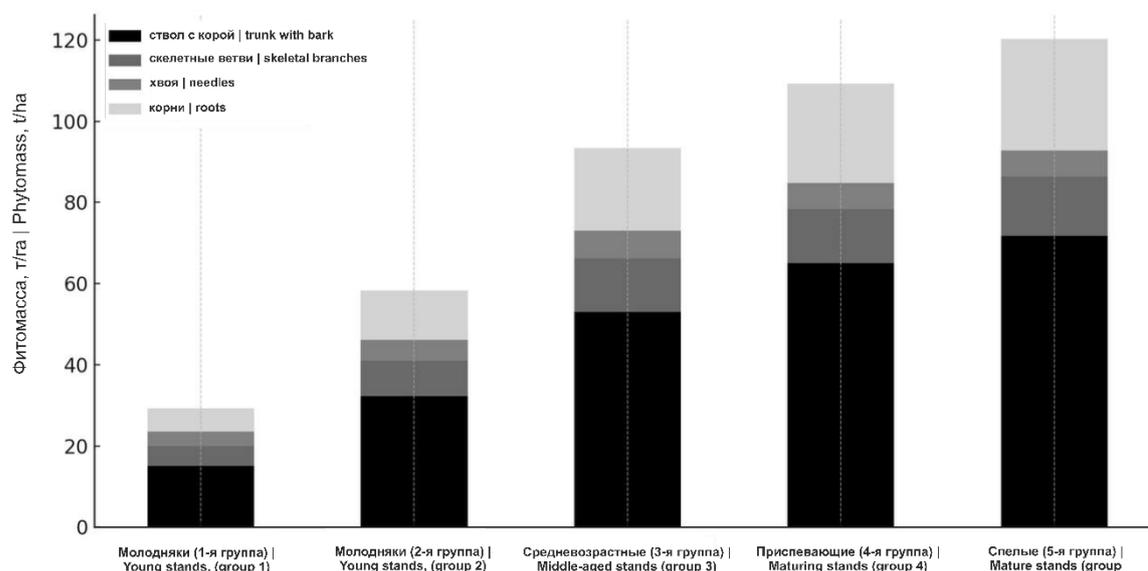


Рисунок 3. Структура фитомассы по возрастным классам древостоя

Figure 3. Structure of phytomass by age classes of forest stand

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Такой эффект обусловлен более низкой густотой спелых древостоев (200 шт/га) по сравнению со средневозрастными (400 шт/га). Таким образом, пик продуктивности экосистемного уровня приходится на средневозрастные насаждения, где оптимально сочетаются относительно высокая индивидуальная продукция и ещё достаточно высокая плотность древостоя. Интересна также то, что продукция

спелых насаждений оказалась выше, чем у приспевающих (2,24 т/га/год при густоте 300 шт/га), несмотря на меньшую плотность древостоя. Это может быть связано с более выраженным диаметральным приростом и увеличением массы хвои у старших деревьев, которые в благоприятных условиях способны поддерживать высокий уровень физиологической активности. Дополнительным фактором может быть пространственная структура

конкретного древостоя: более редкое размещение крон у спелых деревьев снижает внутривидовую конкуренцию за свет и ресурсы, что способствует сохранению значительного индивидуального прироста даже на поздних этапах онтогенеза [25, 26].

Полученные данные подтверждают закономерное увеличение запасов фитомассы с возрастом древостоя, при этом наибольший вклад в суммарную биомассу на всех этапах развития вносит фракция ствола с корой (Pst). Доля хвои (Pf) и скелетных ветвей (Pbr) снижается в относительном выражении, что согласуется с результатами Tsepordey [27] и Wirth et al. [24], указывающими на морфофункциональную перестройку кроны и перераспределение ресурсов в сторону стволовой и корневой биомассы по мере старения насаждений. Умеренное снижение годичной продукции в приспевающих и спелых группах может быть связано с физиологическим торможением прироста, что также описано в работах Ryan et al. (1996) [25, 27, 28, 29, 30].

Заключение

Фитоценоз представляет собой разновозрастные защитные насаждения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), искусственного происхождения. Насаждение сформировано в результате целенаправленного лесоразведения, характеризуется мозаичной возрастной структурой, включающей молодняки, средневозрастные, приспевающие и спелые деревья. Проведённый анализ, основанный на использовании аллометрического моделирования для количественной оценки фитомассы и годичной продукции древостоев *Pinus sylvestris* L. с применением данных сплошной перечислительной таксации, даёт возможность сформулировать ряд ключевых выводов:

1. Запасы фитомассы и годичная продукция сосновых насаждений увеличиваются с возрастом дерева, при этом индивидуальная продукция достигает максимума у спелых деревьев, а продукция на гектар максимальна у

средневозрастных древостоев за счёт более высокой густоты.

2. Запасы фитомассы спелых насаждений сухостепной зоны (120,3 т/га) ниже, чем в оптимальных условиях произрастания, что подчёркивает ограничивающее влияние аридного климата, песчаных почв и дефицита влаги на продуктивность сосновых культур.

3. С возрастом древостоя наблюдается перераспределение фитомассы в сторону ствола с корой и корней, что отражает переход от активного роста к накоплению стабильной биомассы, при этом общий запас на гектар увеличивается за счёт роста массы отдельных деревьев, несмотря на снижение густоты.

4. Годичная продукция сосновых насаждений возрастает с 1,26 т/га у молодняков 1 группы до максимума на уровне экосистемы 3,0 т/га у средневозрастных деревьев (индивидуальная продукция 7,74 кг/дер.), после чего снижается до 2,24 т/га у приспевающих и 2,88 т/га у спелых древостоев (индивидуальная продукция 14,4 кг/дер.), что отражает сочетание роста массы отдельных деревьев и уменьшения густоты древостоя.

Искусственно созданные защитные насаждения сосны, изначально предназначенные для закрепления песков, показывают высокие запасы фитомассы и стабильную годичную продукцию. Это делает их ценными не только для борьбы с опустыниванием, но и для использования в качестве эффективных поглотителей климатически активных газов, что расширяет их практическое применение в управлении экосистемами и климатической политике.

Перспективным направлением является проведение валидации аллометрических моделей на основе прямых измерений отдельных деревьев для уточнения точности оценок фитомассы и годичной продукции. Также перспективным является интеграция данных по фитомассе и годичной продукции в модели углеродного баланса для оценки климатической функции насаждений.

Список литературы

1. Абатуров Б.Д. Сравнительная продуктивность лесных и травяных экосистем // Вестник Российской академии наук. – 2023. – 2. – С. 162-170. – DOI: 10.31857/S0869587323020020. – URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=vestnik&year=2023&vol=93&iss=2&file=Vestnik2302002Abaturov.pdf>.
2. Титлянова А.А., Вишнякова Е.К., Смоленцева Е.Н. Чистая первичная продукция степных экосистем и причины ее пространственной изменчивости // Почвоведение. – 2024. – 3. – С. 428-438. – DOI 10.31857/S0032180X24030046. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69153623>.
3. Кулик К.Н., Беляев А.И., Пугачёва А.М. Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием агроландшафтов // Аридные экосистемы. – 2023. – 1(94). – С. 4-14. – DOI: 10.24412/1993-3916-2023-1-4-14. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_54316543_32431008.pdf.
4. Сорокина О.А., Влияние искусственных древесно-кустарниковых насаждений на биологическую активность почв в степях Хакасии // Лесоведение. – 2023. – 1. – С. 77-84. – DOI: 10.31857/S0024114823010096. – URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=lesved&year=2023&vol=2023&iss=1&file=LesVed2301009Sorokina.pdf>.
5. Кузенко А. Н., Кошелев А.В. Исторический аспект формирования защитных лесных насаждений из сосны обыкновенной в Волгоградской области // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2025. – 1(79). – С. 227-234. – DOI 10.32786/2071-9485-2025-01-23. – EDN YDQGDS. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82275252>.
6. Рослесинфорг: [официальный сайт]. URL: <https://roslesinforg.ru/> (дата обращения: 08.08.2025). – Текст: электронный.
7. Замолодчиков Д.Г., Каганов В.В., Липка О.Н. Потенциальное углерода фитомассой древостоя при восстановлении тугайных лесов // Лесоведение. – 2020. – 2. – С. 115-126. – DOI: 10.31857/S0024114820020114. – URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=lesved&year=2020&vol=2020&iss=2&file=LesVed2002011Zamolodchikov.pdf>.
8. Осипов А.Ф., Кутявин И.Н., Манов А.В., Кузнецов М.А., Бобкова К.С. Запасы и структура фитомассы древостоев северотаежных сосняков Республики Коми // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – 4. – С. 25-38. – DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-25-38. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49168688>.
9. Нагимов З.Я., Суслов А.В., Коломенцева Ю.С. Оценка фитомассы сосновых древостоев на пробных площадях государственной инвентаризации лесов (на примере лесопарков Екатеринбурга) // Леса России и хозяйство в них. – 2023. – 4(87). – С. 47-54. – DOI 10.51318/FRET.2023.87.4.004. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58800418>.
10. Пеккоев А.Н., Мошников С.А., Ромашкин И.В., Тесля Д.В. Запасы углерода в фитомассе древесных растений и крупных древесных остатках в старовозрастных сосняках черничных заповедника «Кивач» // Вопросы лесной науки. – 2024. – 7(4). – С. 62-89. – DOI: 10.31509/2658-607x-202474-156. – URL: https://jfsi.ru/7-4-2024-pekkoev_et_al/.
11. Усольцев В.А., Плюха Н.И., Цепордей И.С. Региональные особенности содержания сухого вещества во фракциях фитомассы деревьев сосны обыкновенной // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2024. – 3(63). – С. 6-19. – DOI 10.25686/2306-2827.2024.3.6. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=74963116>.
12. Ромашкин И.В., Геникова Н.В., Крышень А.М., Мошников С.А., Поликарпова Н.В. Зависимость радиального прироста *Pinus sylvestris* (Pinaceae) от метеорологических условий и аэротехногенного загрязнения на северо-западе Мурманской области // Растительные ресурсы. – 2023. – 59(1). – С. 76-92. – DOI 10.31857/S0033994623010089. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53987083>.

13. Иванов В.П., Марченко С.И., Нартов Д.И., Балухта Л.П. Влияние климатических факторов на радиальный прирост *Pinus sylvestris* и *Picea abies* (Pinaceae) на территории Брянской области // Растительные ресурсы. – 2021. – 57 (1). – С. 39-48. – DOI 10.31857/S0033994621010052. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44769012>.
14. Лебедев А.В. Динамическая модель роста основных древостоев Европейской части России по данным повторных наблюдений // Сибирский лесной журнал. – 2024. – 4. – С. 72-83. – DOI 10.15372/SJFS20240407. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=73951888>.
15. Rogozin M.V. Пять основных законов в развитии древостоев. Научное обозрение // Биологические науки. – 2019. – 3. – С. 32-36. – URL: <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1158>.
16. Методика полевых работ по таксации леса на постоянных пробных площадях в рамках реализации инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг» / Консорциум Ритм углерода. – 2023. – 32 с. // РИТМ углерода: [официальный сайт]. – URL: https://ritm-c.ru/wp-content/uploads/2023/07/metodika-polevyh-rabot-po-taksaczii-na-ppp_27_06_2023-.pdf (дата обращения: 15.08.2025). Текст: электронный.
17. Методология реализации климатического проекта «Увеличение накопления углерода в сельскохозяйственных почвах по результатам агролесомелиорации и агрофитомелиорации» / Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля. – 2023. – 43 с. // Реестр углеродных единиц: [официальный сайт]. – URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/Методика_агромелиорация_чист.pdf (дата обращения: 15.08.2025). Текст: электронный.
18. Усольцев В.А. Моделирование фитомассы корней деревьев и древостоев Евразии по материалам баз данных // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2024. – 4. – С. 4-17. – DOI 10.21178/2079-6080.2024.4.4. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80289552>.
19. Тюкавина, О.Н., Клевцов Д.Н., Неверов Н.А. Аллометрические закономерности изменения надземной фитомассы культур сосны // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. Филиппова. – 2023. – 3(72). – С. 121-127. – DOI 10.34655/bgsha.2023.72.3.014. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54666323>.
20. Усольцев В.А., Цепордей И.С. Климатически обусловленные территориальные изменения фитомассы деревьев лесообразующих видов Евразии и их прогнозирование // Сибирский лесной журнал. – 2021. – 6. – С. 72-90. – DOI: 10.15372/SJFS20210607. – URL: <https://сибирскийлеснойжурнал.рф/articles/usoltsev-v-a-tsepordey-i-s-klimaticheskii-obuslovlennye-territorialnye-izmeneniya-fitomassy-derevev-1/>.
21. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Норицин Д.В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесообразующих пород Урала // Леса России и хозяйство в них. – 2022. – 1(80). – С. 4-14. – DOI 10.51318/FRET.2022.85.72.001. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48615093>.
22. Сурхаев И.Г., Сурхаев Г.А., Рыбашлыкова Л.П. Рост и долгодетие хвойных культур в экотопах песков Терско-Кумского междуречья // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2020. – 4(60). – С. 182-192. – DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-17. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44450748_85736672.pdf.
23. Новичонко Е.В., Галибина Н.А., Никерова К.М. Распределение фитомассы и содержание азота и углерода в хвое сосны обыкновенной в средней тайге республики Карелия // Вопросы лесной науки. – 2025. – 8(1). – С. 1-27. – DOI: 10.31509/2658-607x-202581-162. – URL: https://jfsi.ru/wp-content/uploads/2025/04/8-1-2025-%20Novichonok_et_al.pdf.
24. Uri V., Kukumägi M., Aosaar J., Varik M., Becker H., Aun K., Lõhmus K., Soosaar K., Uri M., Buht M., Sepaste A., Padari A. The dynamics of the carbon storage and fluxes in Scots pine (*Pinus sylvestris*) chronosequence. *Science of the Total Environment*. 2022; 844. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156847. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35007591/>.
25. Liziniewicz M., Almqvist C., Helmersson A., Holmström A., Theodor L. LiDAR-estimated height in a young Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) genetic trial supports high-accuracy early selection for height. *Annals of Forest Science*.

- 2025; 82(1): 1-13. DOI: 10.1186/s13595-025-01283-w. Available from: <https://hal.science/hal-05002506v1/document>.
26. Chen B., Liu S., Yu J., Huang Y., Yu S., Liu H., Zhang T., Liu X., Jin G., Chen W., He X. Stand biomass of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations benefits from high density monocultures in the boreal zone. *Forest Ecosystems*. 2024; 11(5): 100222. DOI: 10.1016/j.fecs.2024.1002 Available from: <https://www.sciopen.com/article/pdf/10.1016/j.fecs.2024.100222.pdf?ifPreview=0>.
27. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. Age-Related Changes in the Ratios of the Components of Aboveground Phytomass of Forest-Forming Species of Eurasia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2025; 17: 949-959. DOI: 10.1134/S1995425524700847. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1995425524700847#citeas>.
28. Pretzsch H., Heym M., Hilmers T., Bravo-Oviedo A., Ahmed Sh. Mortality reduces overyielding in mixed Scots pine and European beech stands along a precipitation gradient in Europe. *Forest Ecology and Management*. 2023; 539: 121008. DOI: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112723002426>. Available from: <https://pub.epsilon.slu.se/31251/1/pretzsch-h-et-al-20230720.pdf>.
29. Assefa, S., Ventura, M., Bravo, F. Pure and mixed Scots pine forests showed divergent responses to climate variation and increased intrinsic water use efficiency across a European-wide climate gradient. *European Journal of Forest Research*. 2025; 144: 875-892. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-024-01731-8>. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-024-01731-8>.
30. Hu M., Lehtonen A., Minunno Fr., Mäkelä A. Age effect on tree structure and biomass allocation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Annals of Forest Science*. 2020; 90. DOI: 10.1007/s13595-020-00988-4. Available from: <https://annforsci.biomedcentral.com/articles/10.1007/s13595-020-00988-4#citeas>.

References

1. Abaturov B.D. Sravnitel'naya produktivnost lesnykh i travnyanykh ekosistem. [Comparative productivity of forest and grassland ecosystems]. *Vestnik rossiyskoy akademii nauk*. 2023; 2: 162-170. (in Russ.). DOI: 110.31857/S0869587323020020. URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=vestnik&year=2023&vol=93&iss=2&file=Vestnik2302002Abaturov.pdf>.
2. Titlyanova A.A., Vishnyakova E.K., Smolentseva E.N. Chistaya pervichnaya produktsiya stepnykh ekosistem i prichiny eye prostranstvennoy izmenchivosti. [Net primary production of steppe ecosystems and the causes of its spatial variability]. *Pochvovedeniye*. 2024; 3: 428-438. (in Russ.). DOI 10.31857/S0032180X24030046. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69153623>.
3. Kulik K.N., Belyayev A.I., Pugacheva A.M. Rol zashchitnogo lesorazvedeniya v borbe s zasukhoi i opustynivaniyem agrolandshaftov. [The role of protective afforestation in combating drought and desertification of agricultural landscapes]. *Aridnyye ekosistemy*. 2023; 1(94): 4-14. (in Russ.). DOI: 10.24412/1993-3916-2023-1-4-14. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_54316543_32431008.pdf.
4. Sorokina O.A. Vliyaniye iskusstvennykh drevesno-kustarnikovykh nasazhdeniy na biologicheskuyu aktivnost pochv v stepyakh Khakasii. [Artificial Forest Stands' Impact on Soils' Biological Activity in Khakassian Steppes]. *Lesovedeniye*. 2023; 1: 77-84. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0024114823010096. DOI: 10.31857/S0024114823010096. URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=lesved&year=2023&vol=2023&iss=1&file=LesVed2301009Sorokina.pdf>.
5. Kuzenko A. N., Koshelev A.V. Istoricheskiy aspekt formirovaniya zashchitnykh lesnykh nasazhdeniy iz sosny obyknovennoy v Volgogradskoy oblasti. [The historical aspect of the formation of protective pine forests in the Volgograd region]. *Izvestiya Nizhnevolskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professionalnoye obrazovaniye*. 2025; 1(79): 227-234. (in Russ.). DOI 10.32786/2071-9485-2025-01-23. – EDN YDQGDS. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82275252>.
6. Roslesinforg [Roslesinforg]. (n.d.). Retrieved August 8, 2025, from <https://roslesinforg.ru/> (in Russ.).

7. Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V., Lipka O.N. Potentsialnoye ugleroda fitomassoy drevostoya pri vosstanovlenii tugaynykh lesov. [The Potential Absorption of Carbon by Trees' Biomass during the Restoration of Riparian Forests]. Lesovedeniye. 2020; 2: 115-126. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0024114820020114. URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=lesved&year=2020&vol=2020&iss=2&file=LesVed2002011Zamolodchikov.pdf>.
8. Osipov A.F., Kutuyavin I.N., Manov A.V., Kuznetsov M.A., Bobkova K.S. Zapasy i struktura fitomassy drevostoyev severotayezhnykh sosnyakov Respubliki Komi. [Reserves and Structure of Phytomass in Northern Taiga Pine Forest Stands in the Komi Republic]. Lesnoy Zhurnal. 2022; 4: 25-38. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-25-38. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49168688>.
9. Nagimov Z.Ya., Suslov A.V., Kolomentseva Yu.S. Otsenka fitomassy sosnovykh drevostoyev na probnykh ploshchadyakh gosudarstvennoy inventarizatsii lesov (na primere lesoparkov Ekaterinburga). [Assessment of the phytomass of pine forests on test areas of the state forest inventory (using the example of Yekaterinburg forest parks)]. Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh. 2023; 4(87): 47-54. (in Russ.). DOI 10.51318/FRET.2023.87.4.004. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58800418>.
10. Pekkoyev A.N., Moshnikov S.A., Romashkin I.V., Teslya D.V. Zapasy ugleroda v fitomasse drevesnykh rasteniy i krupnykh drevesnykh ostatkakh v starovozrastnykh sosnyakakh chernichnykh zapovednika «Kivach». [Carbon stocks in phytomass of woody plants and coarse woody debris in old-growth blueberry pine forests in the natural reserve «Kivach»]. Voprosy lesnoy nauki. 2024; 7(4): 62-89. (In Russ.). DOI: 10.31509/2658-607x-202474-156. URL: https://jfsi.ru/7-4-2024-pekkoev_et_al/.
11. Usoltsev V.A., Plyukha N.I., Tsepordey I.S. Regionalnyye osobennosti sodержaniya sukhogo veshchestva vo fraktsiyakh fitomassy derevyev sosny obyknovenny. [Regional characteristics of the dry matter content in the phytomass fractions of Scots pine trees]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopolzovaniye. 2024; 3(63): 6-19. (In Russ.). DOI 10.25686/2306-2827.2024.3.6. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=74963116>.
12. Romashkin I.V., Genikova N.V., Kryshen A.M., Moshnikov S.A., Polikarpova N.V. Zavisimost radialnogo prirosta Pinus sylvestris (Pinaceae) ot meteorologicheskikh usloviy i aerotekhnogennoho zagryazneniya na severo-zapade Murmanskoy oblasti. [Dependence of radial growth of Pinus sylvestris (Pinaceae) on meteorological conditions and aero-technogenic pollution in the north-west of the Murmansk region]. Rastitelnyye resursy. 2023; 59(1): 76-92. (In Russ.). DOI 10.31857/S0033994623010089. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53987083>.
13. Ivanov V.P., Marchenko S.I., Nartov D.I., Balukhta L.P. Vliyaniye klimaticheskikh faktorov na radialnyy prirost Pinus sylvestris i Picea abies (Pinaceae) na territorii Bryanskoy oblasti. [Influence of climatic factors on the radial growth of Pinus sylvestris and Picea abies (Pinaceae) in the Bryansk Region]. Rastitelnyye resursy. 2021; 57 (1): 39-48. (In Russ.). DOI 10.31857/S0033994621010052. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44769012>.
14. Lebedev A.V. Dinamicheskaya model rosta sosnovykh drevostoyev Evropeyskoy chasti Rossii po dannym povtornykh nablyudeniyy. [Dynamic model of pine forest growth in the European part of Russia based on repeated observations]. Sibirskiy lesnoy zhurnal. 2024; 4: 72-83. (In Russ.). DOI 10.15372/SJFS20240407. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=73951888>.
15. Rogozin M.V. Pyat osnovnykh zakonov v razvitii drevostoyev. [Five basic laws in the development of tree stands]. Nauchnoye obozreniye. Biologicheskkiye nauki. 2019; 3: 32-36. (in Russ.). URL: <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1158>.
16. Methodology for field work on forest taxation at permanent test areas as part of the implementation of the innovative project of national importance "Carbon in Ecosystems: Monitoring" / Rhythms of Carbon Consortium. – 2023. – 32 p. // Rhythms of Carbon: [official website]. Registry of Carbon Units. Retrieved August 15, 2025, from Registry of Carbon Units. Retrieved August 15, 2025, from https://carbonreg.ru/pdf/methodology/Методика_агромелиорация_чист.pdf (in Russ.). (In Russ.).

17. Izrael Institute of Global Climate and Ecology. (2023). Metodologiya realizatsii klimaticheskogo proyekta «Uvelicheniye nakopleniya ugleroda v selskokhozyaystvennykh pochvakh po rezultatam agrolesomelioratsii i agrofitomelioratsii». [Methodology for implementing the climate project "Increasing carbon accumulation in agricultural soils through agroforestry and agrophytomelioration"]. Registry of Carbon Units. Retrieved August 15, 2025, from https://carbonreg.ru/pdf/methodology/Методика_агромелиорация_чист.pdf (in Russ.).
18. Usoltsev V.A. Modelirovaniye fitomassy korney derevyev i drevostoyev Evrazii po materialam baz dannykh. [Modeling of the phytomass of tree roots and tree stands in Eurasia based on database materials // Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry]. Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva. 2024; 4: 4-17. (in Russ.). DOI 10.21178/2079-6080.2024.4.4. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80289552>.
19. Tyukavina. O.N., Klevtsov D.N., Neverov N.A. Allometricheskiye zakonomernosti izmeneniya nadzemnoy fitomassy kultur sosny. [Allometric patterns of changes in the above-ground phytomass of pine cultures]. Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii im. Filippova. 2023. № 3(72). 121-127. (in Russ.). DOI 10.34655/bgsha.2023.72.3.014. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54666323>.
20. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. Klimaticheskiy obuslovlennyye territorialnyye izmeneniya fitomassy derevyev lesoobrazuyushchikh vidov Evrazii i ikh prognozirovaniye. [Climate-induced territorial changes in the phytomass of Eurasian forest-forming tree species and their forecasting]. Sibirskiy lesnoy zhurnal. 2021. № 6. 72-90. (in Russ.). DOI: 10.15372/SJFS20210607. URL: <https://sibirskiylesnoyzhurnal.rf/articles/usoltsev-v-a-tsepordey-i-s-klimaticheski-obuslovlennyye-territorialnye-izmeneniya-fitomassy-derev-ev-l/>.
21. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Noritsin D.V. Allometricheskiye modeli biomassy derevyev lesoobrazuyushchikh porod Urala. [Allometric models of the biomass of the main forest species in the Urals]. Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh. 2022. № 1(80). 4-14. (in Russ.). DOI 10.51318/FRET.2022.85.72.001. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48615093>.
22. Surkhaev I.G., Surkhaev G.A., Rybashlykova L.P. Rost i dolgoletniye khvoynykh kultur v ekotopakh peskov Tersko-Kumskogo mezhdurechya. [Growth and longevity of coniferous crops in ecotopes of the sands of the Tersk-Kumsk interfluvium]. Izvestiya Nizhnevolskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professionalnoye obrazovaniye. 2020; 4(60): 182-192. (In Russ.). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-17. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44450748_85736672.pdf.
23. Novichonok E.V., Galibina N.A., Nikerova K.M. Raspredeleniye fitomassy i sodержaniye azota i ugleroda v khvoye sosny obyknovennoy v sredney tayge respubliky Kareliya. [Phytomass distribution and content of nitrogen and carbon in needles of scots pine in the middle taiga in the republic of Karelia]. Voprosy lesnoy nauki. 2025; 8(1): 1-27. (In Russ.). DOI: 10.31509/2658-607x-202581-162. URL: https://jfsi.ru/wp-content/uploads/2025/04/8-1-2025-%20Novichonok_et_al.pdf.
24. Uri V., Kukumägi M., Aosaar J., Varik M., Becker H., Aun K., Lõhmus K., Soosaar K., Uri M., Buht M., Sepaste A., Padari A. The dynamics of the carbon storage and fluxes in Scots pine (*Pinus sylvestris*) chronosequence. Science of the Total Environment. 2022; 844. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156847. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35007591/>
25. Liziniewicz M., Almqvist C., Helmersson A., Holmström A., Theodor L. LiDAR-estimated height in a young Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) genetic trial supports high-accuracy early selection for height. Annals of Forest Science. 2025; 82(1): 1-13. DOI: 10.1186/s13595-025-01283-w. Available from: <https://hal.science/hal-05002506v1/document>.
26. Chen B., Liu S., Yu J., Huang Y., Yu S., Liu H., Zhang T., Liu X., Jin G., Chen W., He X. Stand biomass of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations benefits from high density monocultures in the boreal zone. Forest Ecosystems. 2024; 11(5): 100222. DOI: 10.1016/j.fecs.2024.100222 Available from: <https://www.sciopen.com/article/pdf/10.1016/j.fecs.2024.100222.pdf?ifPreview=0>.

27. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. Age-Related Changes in the Ratios of the Components of Aboveground Phytomass of Forest-Forming Species of Eurasia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2025; 17: 949-959. DOI: 10.1134/S1995425524700847. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1995425524700847#citeas>.
28. Pretzsch H., Heym M., Hilmers T., Bravo-Oviedo A., Ahmed Sh. Mortality reduces overyielding in mixed Scots pine and European beech stands along a precipitation gradient in Europe. *Forest Ecology and Management*. 2023; 539: 121008. DOI: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112723002426>. Available from: <https://pub.epsilon.slu.se/31251/1/pretzsch-h-et-al-20230720.pdf>.
29. Assefa, S., Ventura, M., Bravo, F. Pure and mixed Scots pine forests showed divergent responses to climate variation and increased intrinsic water use efficiency across a European-wide climate gradient. *European Journal of Forest Research*. 2025; 144: 875-892. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-024-01731-8>. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-024-01731-8>.
30. Hu M., Lehtonen A., Minunno Fr., Mäkelä A. Age effect on tree structure and biomass allocation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Annals of Forest Science*. 2020; 90. DOI: 10.1007/s13595-020-00988-4 Available from: <https://annforsci.biomedcentral.com/articles/10.1007/s13595-020-00988-4#citeas>.

Сведения об авторах

✉ *Поташкина Юстина Николаевна* – младший научный сотрудник лаборатории агротехнологий и систем земледелия в агролесоландшафтах, ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8846-2354>, e-mail: potashkina-y@vfanc.ru

Косхелев Александр Валентинович – кандидат с.-х. наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник лаборатории агротехнологий и систем земледелия в агролесоландшафтах, ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4048-7549>, e-mail: koshelev_av@vfanc.ru

Веденеева Варвара Александровна – кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории агротехнологий и систем земледелия в агролесоландшафтах ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6623-6062>, e-mail: vedeneeva-v@vfanc.ru

Шатровская Мария Олеговна – младший научный сотрудник лаборатории агротехнологий и систем земледелия в агролесоландшафтах, ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт. Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3202-4184>, e-mail: shatrovskayam@vfanc.ru

Information about the authors

✉ *Yustina N. Potashkina* – Junior Research Fellow at the Laboratory of Agrotechnologies and Farming Systems in Agroforest Landscapes, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetskij avenue, Volgograd, 400062, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8846-2354>, e-mail: potashkina-y@vfanc.ru

Aleksandr V. Koshelev – Cand. Sci. (Agric.), Head of the Laboratory, Leading Researcher at the Laboratory of Agrotechnologies and Farming Systems in Agroforest Landscapes, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetskij avenue, Volgograd, 400062, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4048-7549>, e-mail: koshelev_av@vfanc.ru

Varvara A. Vedeneyeva – Cand. Sci. (Agric.), Senior Researcher at the Laboratory of Agrotechnologies and Farming Systems in Agroforest Landscapes, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetskij avenue, Volgograd, 400062, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6623-6062>, e-mail: vedeneeva-v@vfanc.ru

Mariya O. Shatrovskaya – Junior Research Fellow at the Laboratory of Agrotechnologies and Farming Systems in Agroforest Landscapes, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetskij avenue, Volgograd, 400062, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3202-4184>, e-mail: shatrovskayam@vfanc.ru

✉ – Для контактов /Corresponding author