

Научная статья

УДК 630*181.62:630*531

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-40-50

Особенности роста сосны обыкновенной в условиях Красноярской лесостепи

В.В. Иванов, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [N-6755-2019](https://orcid.org/0000-0003-0799-0716),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0799-0716>

А.Н. Борисов , канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AHI-4929-2022](https://orcid.org/0000-0002-7837-5043),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7837-5043>

О.А. Шапченкова, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [F-7590-2017](https://orcid.org/0000-0002-1392-5171),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1392-5171>

А.Е. Петренко, канд. биол. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [AAC-5411-2021](https://orcid.org/0000-0003-3444-5297),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3444-5297>

Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН – Красноярский научный центр СО РАН, Академгородок, д. 50, стр. 28, г. Красноярск, Россия, 660036; viktor_ivanov@ksc.krasn.ru, alnik_borisov@mail.ru , shapchenkova@mail.ru, alcorsci@bk.ru

Поступила в редакцию 17.08.22 / Одобрена после рецензирования 10.11.22 / Принята к печати 15.11.22

Аннотация. Изучены особенности роста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на примере одновозрастного соснового насаждения с высокой полнотой. Многолетние исследования проведены на постоянной пробной площади. Данные по объекту собраны начиная с его 37-летнего возраста и заканчивая возрастом 55 лет. Проанализированы характеристики отдельных деревьев и всего насаждения за период роста в отсутствие внешних воздействий (рубок, ветровалов, повреждений вредителями и др.) и после проведения рубок ухода. Рассмотрено влияние величины доступного для дерева ресурса на формирование крон, корневой системы и стволовой древесины. Величиной доступного ресурса служила площадь области доминирования. Корневая система сосны изучаемых насаждений имеет компактные размеры и, несмотря на высокую полноту древостоя, благодаря значительному содержанию питательных веществ в почве и отсутствию дефицита влаги в достаточной мере обеспечивает интенсивный рост деревьев, соответствующий условиям I класса бонитета. Установлено, что в данных условиях средняя площадь корневой системы соразмерна средней площади области доминирования. Показано, что диаметр ствола на высоте 1,3 м в отсутствие внешних воздействий существенно зависит от площади области доминирования. Коэффициент корреляционной связи этих показателей для изучаемого насаждения в его 37-летнем возрасте составляет 0,89. Методами дендрохронологии изучено влияние рубок на годичный радиальный прирост. Выявлено, что на следующий после рубки год он повысился в 1,3–2,0 раза в зависимости от увеличения площади области доминирования. Предложен метод расчета коэффициента конкуренции как доли ресурса, необходимого для свободного роста дерева, которая перераспределяется между его ближайшими соседями. Многолетние наблюдения показали, что при коэффициентах конкуренции, превышающих 0,6–0,7, темпы роста по диаметру ствола существенно снижаются, у деревьев формируется разреженная крона протяженностью менее 40 % от высоты дерева. Это, в свою очередь, приводит к отставанию в росте и переходу к угнетенному состоянию. Данные о коэффициентах конкуренции могут быть использованы для своевременного принятия решений о рубке и ее интенсивности.

© Иванов В.В., Борисов А.Н., Шапченкова О.А., Петренко А.Е., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L., конкуренция, доступный ресурс, кроны, корневая система, рост по диаметру, Красноярская лесостепь

Для цитирования: Иванов В.В., Борисов А.Н., Шапченкова О.А., Петренко А.Е. Особенности роста сосны обыкновенной в условиях Красноярской лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 40–50. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-40-50>

Original article

The Peculiarities of Scots Pine Growth in the Conditions of the Krasnoyarsk Forest-Steppe

Viktor V. Ivanov, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [N-6755-2019](https://orcid.org/0000-0003-0799-0716), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0799-0716>

Aleksandr N. Borisov[✉], Candidate of Engineering, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AHI-4929-2022](https://orcid.org/0000-0002-7837-5043), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7837-5043>

Olga A. Shapchenkova, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [F-7590-2017](https://orcid.org/0000-0002-1392-5171), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1392-5171>

Alexey E. Petrenko, Candidate of Biology, Research Scientist;

ResearcherID: [AAC-5411-2021](https://orcid.org/0000-0003-3444-5297), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3444-5297>

Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; viktor_ivanov@ksc.krasn.ru, alnik_borisov@mail.ru[✉], shapchenkova@mail.ru, alcorsci@bk.ru

Received on August 17, 2022 / Approved after reviewing on November 10, 2022 / Accepted on November 15, 2022

Abstract. The growth peculiarities of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) have been studied by the example of an even-aged pine stand of high density. A long-term research has been conducted on a permanent sample plot. The data has been collected from the stand aged from 37 to 55 years. The characteristics of individual trees and the entire stand during the growth period in the absence of external influences (cutting, windfalls, pest damage, etc.) and after improvement cuttings have been analyzed. The influence of the amount of resource available to a tree on the formation of crowns, root systems and stem wood has been investigated. The size of the available resource has been the square of the dominance area. The root system of the pine trees of the studied stands is compact in size and, despite the high stand density, due to the high content of nutrients in the soil and the absence of moisture deficiency, it sufficiently ensures intensive tree growth corresponding to the conditions of the I quality class. It has been found that under these conditions, the average area of the root system is proportional to the average square of the dominance area. It has been shown that the stem diameter at a height of 1.3 m in the absence of external influences significantly depends on the square of the dominance area. The correlation coefficient of these indicators for the studied stand at the age of 37 is 0.89. The influence of cuttings on annual radial increment has been studied using dendrochronology methods. It has been revealed that in the year following the cutting, it has increased by 1.3–2.0 times, depending on the increase in the square of the dominance area. A method has been proposed for calculating the competition coefficient as a share of the resource required for the free growth of a tree, which is redistributed between its closest neighbours. Long-term observations have shown that with competition coefficients



exceeding 0.6–0.7, the stem diameter increment rate decreases significantly, and the trees develop a sparse crown extending less than 40 % of the tree height. This, in turn, leads to growth retardation and a transition to a depressed state. This, in turn, leads to growth retardation and a transition to a depressed state.

Keywords: Scots pine, *Pinus sylvestris* L., competition, available resource, crowns, root system, diameter increment, the Krasnoyarsk forest-steppe

For citation: Ivanov V.V., Borisov A.N., Shapchenkova O.A., Petrenko A.E. The Peculiarities of Scots Pine Growth in the Conditions of the Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 40–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-40-50>

Введение

Сосновые боры лесостепной зоны широко распространены в Западной и Восточной Сибири. Они сформированы в результате пожаров и интенсивного освоения территории подзоны южной тайги в конце XIX – начале XX вв. Сосняки лесостепных боров в основном представлены 100–140-летними древостоями, выполняющими водоохранно-защитные, рекреационные и другие полезные функции. При существующем уровне ведения лесного хозяйства в Сибири степень использования потенциальной продуктивности сосняков невелика. Применение системных рубок ухода на разных возрастных этапах формирования сосновых древостоев позволяет значительно увеличить общую продуктивность использования лесных ресурсов и его рациональность.

Рост всех компонентов дерева происходит соразмерно, в соответствии с законами аллометрии, что подтверждается исследованиями [7, 22]. Корневая система дерева является основным источником поступления влаги, макро- и микроэлементов, в связи с этим размеры и рост всех структур дерева коррелируют с размерами корневой системы [7, 9]. Темпы роста деревьев по высоте и диаметру ствола значительно меняются в зависимости от густоты древостоя [5, 6, 20]. Эффективным инструментом для изучения закономерностей роста деревьев служит моделирование [9, 15, 18, 19, 21, 22]. Многие исследователи отмечают, что площадь роста в значительной мере определяет как рост отдельных деревьев, так и динамику характеристик древостоя в целом [3, 4, 10]. Существует ряд методов оценки площади роста дерева, показавших свою эффективность при моделировании их роста [3, 9]. Особую значимость приобретают научные изыскания в области закономерностей формирования и роста сосновых насаждений, выполняющих защитные функции в условиях лесостепной зоны.

Цель данной работы – изучение особенностей роста (ствола, кроны и корневой системы) сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зависимости от величины доступного ресурса в условиях конкуренции.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является сосняк мелкотравно-зеленомошный, произрастающий в условиях Красноярской лесостепи (рис. 1). На постоянной пробной площади (ПП) и на контрольном участке без рубок ухода, заложенном в пределах того же таксационного выдела, определены координаты всех деревьев и основные таксационные показатели древостоя (табл. 1).

Рис. 1. Сосновый древостой в возрасте 55 лет на ПП
в пределах исследуемого таксационного выдела

Fig. 1. The pine stand aged 55 years on the SP within
the studied survey plot



Таблица 1

Основные таксационные показатели древостоя на ПП и контрольном участке
The main inventory indicators of the stand on the SP and the control plot

Состояние	Возраст, лет	Густота, шт./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Сумма площадей сечения, м ² /га	Полнота	Запас, м ³ /га
До рубки	37	5460	10,5	15,7	47,3	1,4	369
После рубки		2730	13,2	17,6	37,5	1,1	333
До рубки	51	2420	15,8	19,0	47,4	1,3	430
После рубки		1280	18,0	19,7	32,5	0,9	304
После рубки (через 4 года)	55	1250	20,3	21,0	40,4	1,0	396
Контроль	55	1950	18,6	20,7	53,0	1,3	513

Данные по объекту исследования собраны с 37-летнего возраста древостоя до его возраста 55 лет. За этот период на ПП 2 раза проводились рубки ухода по низовому методу (прочистки и прореживание). Низовой метод чаще всего применяется в чистых 1-ярусных хвойных насаждениях. При этом в рубку преимущественно назначались угнетенные деревья, относящиеся к 4-му и 5-му классам роста и развития по шкале Крафта. На базе трактора МТЗ-82.1 и бензопилы осуществлялось равномерное разреживание, направленное на регулирование густоты древостоя и создание благоприятных условий для формирования стволов и крон лучших деревьев.

Интенсивность рубки по запасу составила 10 и 29 % в возрасте 37 лет и 51 года соответственно. Густота после рубки была 2730 и 1280 шт./га соответственно. Через 4 года после рубки, в возрасте 55 лет, древостой имел средние диаметр 20,3 см и высоту 21,0 м. Относительная полнота равнялась 1,0, запас древесины – 396 м³/га и сумма площадей поперечного сечения стволов – 40,4 м²/га.

Почвенный покров сосняка мелкотравно-зеленомошного представлен серыми лесными почвами. Данные по их физико-химическим свойствам, полученные с использованием агрохимических методов [1, 2], описаны нами ранее [16]. В частности, по гранулометрическому составу почвы относятся к легкосуглинистым, реакция среды кислая в органогенном горизонте и слабокислая в минеральной части профиля, содержание гумуса высокое.

Методы изучения корневых систем отличаются большой трудоемкостью. Поскольку в данной работе не стояло задачи описания фракционной структуры корней, то наиболее рациональным было использование метода подкопа и вывала. Этим методом были обследованы корневые системы 7 модельных деревьев.

Радиальный прирост стволов по диаметру устанавливался дендрохронологическим методом по кернам, для чего в 47-летнем возрасте на ПП с помощью возрастного бурава на высоте 1,3 м было взято 250 кернов, а в 55-летнем возрасте – 15. Высоты деревьев и протяженность крон измерялись лазерным высотомером-дальномером TruPulse 200 не менее чем для 15 деревьев разных ступеней толщины. Радиусы крон определялись по 8 азимутальным направлениям. Площадь проекции крон устанавливалась по материалам фотосъемки, проведенной с помощью квадрокоптера DJI Phantom 3 Pro с высоты 150 м, что обеспечило разрешение на местности около 25 см. Обработка снимков выполнена в программе ArcGIS. По этим снимкам в программе ArcMap все кроны на исследуемом участке были ооконтурены с вычислением их площади проекции.

Величина доступного ресурса для деревьев сосны оценивалась методом областей доминирования (ОД) [3], где этой областью считается участок, в пределах которого дерево оказывает доминирующее влияние с точки зрения использования доступных ресурсов. Для количественной оценки напряженности конкуренции за доступный ресурс между деревом и его ближайшими соседями предложен коэффициент конкуренции (КК), который зависит от площади ОД ($S_{од}$).

Статистическая обработка данных и регрессионный анализ выполнены в программе Excel. Вычисление $S_{од}$ в соответствии с предложенным методом, графическая визуализация ОД и их границ выполнены с помощью программы, написанной на языке Object Pascal в Delphi.

Результаты исследования и их обсуждение

Подземная часть сосны – сложная биологическая система, которая объединяет корни различного функционального назначения, строения и организации. Доля общей массы абсолютно сухого вещества корней варьирует от 17 % для I класса бонитета до 27 % для IV [8]. При изучении особенностей роста фитомассы сосняков практический интерес представляет использование отношения массы корней к запасу стволовой древесины ($M_{корн}/M_{ств}$). Оно зависит от возраста, породного состава и региональных особенностей насаждения.

По данным М.Г. Семечкиной [12], в условиях Красноярской лесостепи у сосен с диаметром ствола на высоте 1,3 м (d) 12 см фитомасса корней в возрасте 23 года составляет 19,2 % от массы всей надземной части дерева. При увеличении диаметра ствола доля корней уменьшается – 14,1 % при диаметре ствола 20 см. Исследованиями В.Д. Стаканова [13] в условиях Погорельского бора установлено, что доля фитомассы корней от общей массы ($M_{общ}$) у сосны в 35 лет – в среднем 16,6 % (от 10,3 до 25,3 %), в 39 лет – 14,5 % и в 90 лет – 18,1 %. По методике, приведенной в [17], для ПП и контрольного участка рассчитана фитомасса фракций в абсолютно сухом состоянии (табл. 2). На ПП в возрасте 37 лет и 51 года отношение $M_{корн}/M_{общ}$ равно 0,20 и 0,18 соответственно, для крон – 0,12 и 0,10 соответственно. На контрольном участке – 0,18 и 0,10 соответственно для корней и крон.

Таблица 2

**Фитомасса фракций сосны обыкновенной в абсолютно сухом состоянии
для III и контрольного участка**
**The phytomass of Scots pine fractions in a completely dry state for the SP
and the control plot**

Возраст, лет	Состояние	Запас, м ³ /га	Фитомасса фракции, т/га			
			Ствол	Крона	Корни	Всего
37	До рубки	369	144,2	25,6	42,9	212,6
51	До рубки	430	167,7	23,9	43,2	234,8
55	Контроль	513	200,7	26,8	49,6	277,1

В исследованиях, посвященных динамике роста корневых систем, отмечается, что у сосны обыкновенной площадь проекции корневых систем наиболее интенсивно увеличивается в возрасте 18–30 лет, после чего скорость роста существенно уменьшается, а дальнейшее развитие корневой системы происходит за счет увеличения корнезаселенности [11]. По форме и строению у сосны, в соответствии с классификацией М.Е. Ткаченко [14], выделяется 4 типа корневых систем: глубокостержневая, якорная, поверхностная и густая щетковидная. Условия высокой конкуренции при густоте древостоя 1250 шт./га и относительной полноте 1,0 отразились на формировании корневых систем деревьев. В данных почвенных условиях у сосны преобладают 2 типа корневых систем: неглубокая, но густая щетковидная без хорошо выраженных горизонтальных и вертикальных скелетных корней, характерная для сосен на глинистых почвах; якорная – со слабо развитым стержневым корнем, но развитыми горизонтальными корнями, от которых отходят якорные (рис. 2). Основная часть корней (до 80 %) проникает в почву на глубину до 70 см. Радиус распространения корней 1-го, 2-го и 3-го порядка в поверхностном слое почвы (до 20 см) в среднем составил 1,75 м. В работе по моделированию горизонтальной структуры корней на основе регрессионного анализа установлена зависимость ($R^2 = 0,82$) от диаметра ствола дерева средней дальности распространения корней и их максимальной длины [15]. Выявлено, что максимальная длина корней может в 2 раза превосходить среднюю. Из этого следует, что при используемом методе подкопа и вывала, несмотря на обрыв некоторых корней, обеспечивается корректная оценка области основной массы корневой системы.

Полученные данные показывают, что при среднем диаметре стволов модельных деревьев 27,8 см средняя площадь корневой системы составляет 9,6 м², что соразмерно средней $S_{од}$ для этих деревьев – 14,1 м². Таким образом, корневая система в данном древостое имеет компактные размеры, и конкуренция за почвенные ресурсы выражена слабо. Благодаря высокому содержанию питательных веществ в верхнем слое почвы (0–20 см) и отсутствию дефицита влаги в достаточной мере обеспечивается интенсивный рост деревьев, соответствующий условиям I класса бонитета. С другой стороны, высокая полнота древостоя обостряет световую конкуренцию, что отражается на формировании крон деревьев.

В соответствии с законом аллометрии [7], в процессе онтогенеза происходит соразмерный рост всех компонентов дерева: корней, кроны и ствола. Темпы роста этих компонентов меняются с возрастом и зависят от доступного дереву ресурса на каждом этапе развития этого дерева. Поставщиками питательных веществ выступают корни и фотосинтетический аппарат кроны.



Рис. 2. Корневые системы сосны в возрасте 55 лет: *а* – щетковидная; *б* – якорная

Fig. 2. The root systems of pine trees aged 55 years: *a* – brush-like; *b* – anchor

Крона формируется в условиях конкуренции за световой поток фотосинтетически активной радиации, и ее размеры связаны с развитием других компонентов дерева [22]. С целью изучения характеристик крон для соснового древостоя была проведена крупномасштабная съемка с использованием квадрокоптера. Получены данные о расположении деревьев на ПП, контуры крон и границы ОД (рис. 3). Проекция крон практически не выходит за пределы ОД. Об этом говорят средняя площадь крон ($S_{кр}$) и $S_{од}$, которые составляют $4,6 \pm 1,6$ и $6,3 \pm 1,9$ м² соответственно.

Регрессионный анализ показал наличие тесной связи между $S_{кр}$ и $S_{од}$:

$$S_{кр} = 0,655 + 0,345S_{од} \text{ при } R = 0,84.$$

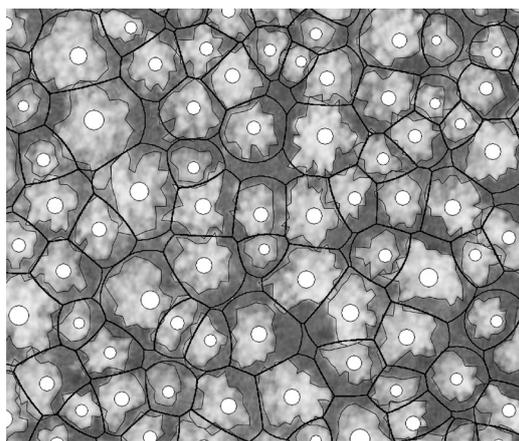


Рис. 3. Фрагмент ПП в возрасте 51 год (черные тонкие линии – контуры крон; жирные – границы областей доминирования; белые круги – стволы деревьев)

Fig. 3. The fragment of the SP aged 51 years (the black thin lines mark the contours of the crowns; the black bold lines mark the boundaries of the dominance areas; the white circles mark the tree stems)

До 37-летнего возраста деревья на ПП росли в отсутствие экзогенных воздействий. Ресурс между особями распределялся в условиях напряженных конкурентных взаимодействий и до этого возраста мало менялся. Поэтому выявление связи диаметра стволов с величиной доступного ресурса обоснованно. С помощью регрессионного анализа установлена связь диаметров ствола в 37 лет с $S_{од}$:

$$d = 5,63 + 1,94S_{од} \text{ при } R = 0,89.$$

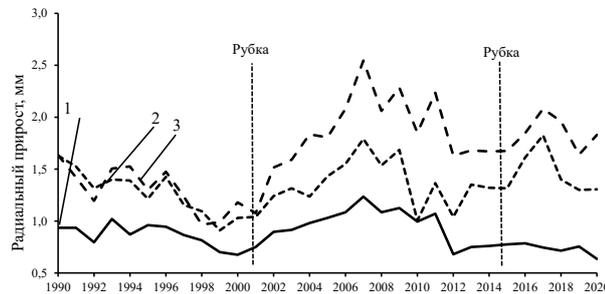
Проведение рубки в 37-летнем возрасте снизило конкурентную напряженность, а освободившийся ресурс перераспределился между остальными особями. Были изучены данные 250 кернов, взятых на ПП. Эти данные разбиты на 3 группы: в 1-ю вошли деревья, для которых $S_{o,d}$ возросла на 2 м² и более; во 2-ю – деревья с увеличением $S_{o,d}$ от 1 до 2 м² и в 3-ю – с повышением $S_{o,d}$ менее 1 м². Число деревьев в этих группах составляет 40, 72 и 138 шт. соответственно. Выявлено, что уже на следующий после рубки год годичный радиальный прирост стал увеличиваться и через 6 лет у деревьев в 1-й группе повысился на $0,85 \pm 0,15$ мм, во 2-й – на $0,67 \pm 0,37$ мм, а в 3-й – уменьшился на $0,02 \pm 0,30$ мм.

Повторное обследование ПП в 47-летнем возрасте показало, что полнота древостоя достигла 1,5, что привело к появлению значительного числа угнетенных деревьев (более 58 % имели диаметр ствола менее среднего). Высокая полнота обусловила формирование разреженных крон с небольшой протяженностью. Так, при среднем диаметре ствола 16 см она была около 30 % от высоты дерева. Поэтому в 2015 г. на ПП проведена рубка ухода (прореживание) в возрасте 51 год таким образом, чтобы остались деревья с более высокими $S_{o,d}$. Интенсивность рубки по числу стволов составила 47 %, а по запасу – 29 %. В результате рубки средняя $S_{o,d}$ выросла с 3,8 до 6,7 м².

В возрасте 55 лет на ПП были взяты керны 15 модельных деревьев. На рис. 4 показана динамика прироста по диаметру для модельного дерева с контрольного участка (модель 1) и для 2 деревьев, типичных для 1-й и 2-й групп (модели 2 и 3 соответственно).

Рис. 4. Динамика радиального прироста сосны обыкновенной на ПП и контрольном участке (1, 2, 3 – номера моделей)

Fig. 4. The dynamics of radial increment of Scots pine on the SP and the control plot (1, 2, 3 – model numbers)



Рубки привели к более равномерному распределению ресурсов между оставшимися деревьями, что подтверждается снижением стандартного отклонения величины $S_{o,d}$ с 2,2 м² до рубки до 1,9 м² – после. В 2001 и 2015 гг. после рубки $S_{o,d}$ увеличилась для модели 2 на 1,2 и 3,8 м² соответственно, а для модели 3 – на 3,6 и 5,2 м² соответственно. Пример перераспределения доступного ресурса в результате рубок приведен на рис. 5, где показана динамика области доминирования для модели 3.

Для количественной оценки напряженности конкуренции за доступный ресурс между деревом и его ближайшими соседями предлагается использовать КК в соответствии с выражением

$$КК = 1 - S_{o,d} / S_f,$$

где S_f – площадь свободного роста дерева (м²), рассчитанная по методике, описанной в работе [4].

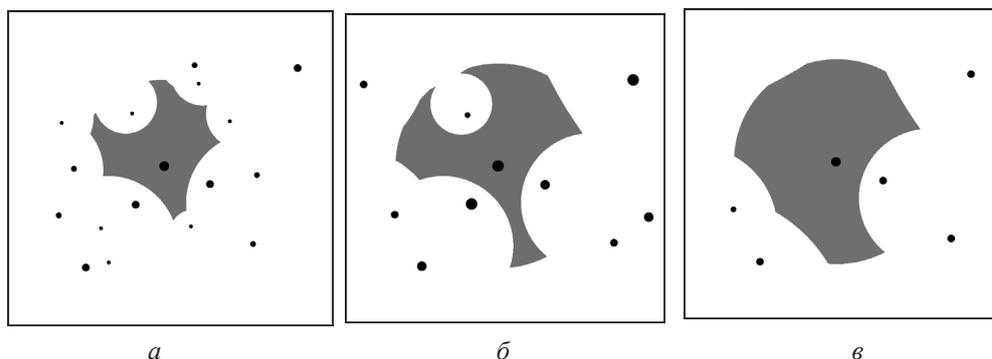


Рис. 5. Область доминирования дерева для модели 3: *a* – в 37 лет до рубки; *б* – в 37 лет после рубки; *в* – в 51 год после рубки (черные круги – стволы деревьев)

Fig. 5. The dominance area of the tree for the model: *a* – at 37 years before cutting; *б* – at 37 years after cutting; *в* – at 51 years after cutting (black circles mark the tree stems)

КК меняется в пределах от 0 до 1 и показывает, какая доля ресурса, необходимого для свободного роста дерева, перераспределяется между его ближайшими соседями. Для модели 3 КК составляет в возрасте 37 лет до рубки, 37 лет после рубки и 51 года после рубки 0,64, 0,56 и 0,50 соответственно, что говорит о существенном снижении конкуренции между деревьями в результате проведенных прореживаний.

Ранее отмечалось, что у деревьев с $S_{о.д}$ менее 40 % от S_f (что соответствует КК > 0,6) темпы роста по диаметру ствола существенно снижаются [4]. У таких деревьев формируется разреженная крона протяженностью менее 40 % от высоты дерева. Это, в свою очередь, приводит к отставанию в росте и переходу к угнетенному состоянию.

Заключение

Между таксационными характеристиками и компонентами фитомассы деревьев существует тесная связь. Проведенные исследования показывают, что коэффициент корреляции площади проекции кроны сосны обыкновенной с площадью области доминирования в рассматриваемых средневозрастных сосновых древостоях составляет 0,84. Проекция кроны практически не выходит за пределы области доминирования. Об этом говорят и средние площади кроны и областей доминирования, которые составляют $4,6 \pm 1,6$ и $6,3 \pm 1,9$ м² соответственно.

Корневая система деревьев сосны изучаемых насаждений имеет компактные размеры и, несмотря на высокую полноту древостоя, благодаря достаточности питательных веществ в почве и отсутствию дефицита влаги обеспечивает интенсивный рост деревьев, соответствующий условиям I класса бонитета. В данных условиях средняя площадь корневой системы соразмерна средней площади области доминирования.

Предложенный коэффициент конкуренции основан на оценке доли доступного ресурса, отчуждаемого от дерева в пользу ближайших соседей. Информация о достижении древостоем критических значений данного коэффициента может быть использована для своевременного принятия решений о рубке и ее интенсивности, что позволит повысить продуктивность древостоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агрохимические методы исследования почв / отв. ред. А.В. Соколов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1975. 656 с.
Agrochemical Methods of Soil Research. Ed.-in-chief A.V. Sokolov. 5th ed., revised and enlarged. Moscow, Nauka Publ., 1975. 656 p. (In Russ.).
2. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Моск. ун-т, 1970. 487 с.
Arinushkina E.V. Manual of Chemical Analysis of Soils. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, Moscow University Publ., 1970. 487 p. (In Russ.).
3. Борисов А.Н. Метод оценки распределения ресурса между деревьями в древостое // Состояние лесов и актуальные проблемы лесоуправления: материалы Всерос. конф. с междунар. участием / отв. ред. А.П. Ковалев. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2013. С. 293–296.
Borisov A.N. The Method of an Estimation of Sharing of a Resource between Trees in a Forest Stand. *State of the Forests, Actual Problems of Forestry and Forest Management: Proceedings of All-Russian Conference with International Participation*. Exec. ed. A.P. Kovalev. Khabarovsk, Far East Forestry Research Institute. Press, 2013, pp. 293–296. (In Russ.).
4. Борисов А.Н., Иванов В.В., Петренко А.Е. Формирование пространственной структуры сосновых древостоев при рубках ухода // Лесоведение. 2019. № 1. С. 7–18.
Borisov A.N., Ivanov V.V., Petrenko A.E. Spatial Structure of Pine Stands Formed by Improvement Cuttings. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2019, no. 1, pp. 7–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819010042>
5. Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С., Собачкин Д.С., Собачкин Р.С. Естественное изреживание разногустотных молодняков в экспериментальных посадках сосны // Хвойные бореал. зоны. 2008. Т. XXV, № 3–4. С. 244–249.
Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S., Sobachkin D.S., Sobachkin R.S. Natural Thinning of Young Stands of Different Density in Experimental Pine Plantations. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2008, vol. XXV, no. 3–4, pp. 244–249. (In Russ.).
6. Вайс А.А. Оптимизация горизонтальной структуры смешанных разновозрастных пихтовых древостоев // Лесн. таксация и лесоустройство. 2005. № 2(35). С. 17–21.
Vajs A.A. Optimization of the Horizontal Structure of Mixed Uneven-Aged Fir Stands. *Lesnaya taksatsiya i lesoustrojstvo = Forest Inventory and Forest Planning*, 2005, no. 2(35), pp. 17–21. (In Russ.).
7. Вайс А.А. Аллометрические закономерности соотношения фитомассы хвои и диаметров деревьев в сосновых разнополнотных древостоях Приангарского района // Междунар. журн. эксперим. образования. 2015. № 11, ч. 2. С. 303–304.
Vajs A.A. Allometric Patterns of the Ratio of the Phytomass of Needles and Tree Diameters in Pine Stands of Different Sizes in the Priangarskiy Region. *Mezhdunarodnyj zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya = International Journal of Experimental Education*, 2015, no. 11-2, pp. 303–304. (In Russ.).
8. Ильинский В.В. Биомасса сосны в насаждениях различных бонитетов // Лесн. хоз-во. 1968. № 3. С. 34.
Il'inskij V.V. Pine Biomass in Stands of Different Quality Levels. *Lesnoe khozyajstvo*, 1968, no. 3, p. 34. (In Russ.).
9. Кузьмичев В.В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2013. 207 с.
Kuz'michev V.V. *Patterns of Tree Stand Dynamics: Principles and Models*. Novosibirsk, Nauka Publ. (Sib. branch), 2013. 207 p. (In Russ.).
10. Нагимов З.Я. Закономерности роста и формирования надземной фитомассы сосновых древостоев: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург, 2000. 40 с.
Nagimov Z.Ya. *Patterns of Growth and Formation of Aboveground Phytomass of Pine Stands: Doc. of Agric. Sci. Diss. Abs.* Yekaterinburg, 2000. 40 p. (In Russ.).

11. Рахтеенко И.Н. Корневые системы древесных и кустарниковых пород. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 107 с.
Rakhteenko I.N. *Root Systems of Trees and Shrubs*. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1952. 107 p. (In Russ.).
12. Семечкина М.Г. Структура фитомассы сосняков. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 165 с.
Semechkina M.G. *The Structure of the Phytomass of Pine Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ. (Sib. Branch), 1978. 165 p. (In Russ.).
13. Стаканов В.Д. Распределение органического вещества в различных частях деревьев сосны обыкновенной // Лесоведение. 1990. № 4. С. 25–33.
Stakanov V.D. Distribution of Organic Matter in Different Parts of Scots Pine Trees. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1990, no. 4, pp. 25–33. (In Russ.).
14. Ткаченко М.Е. Общее лесоводство. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 600 с.
Tkachenko M.E. *General Forestry*. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1952. 600 p. (In Russ.).
15. Шанин В.Н. Моделирование горизонтального распространения корней деревьев в различных условиях местообитания // Лесоведение. 2015. № 2. С. 130–139.
Shanin V.N. Modeling of Lateral Distribution of Tree Roots of Various Forest Types. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2015, no. 2, pp. 130–139. (In Russ.).
16. Шапченкова О.А., Ковалева Н.М., Иванов В.В., Собачкин Р.С., Собачкин Д.С., Петренко А.Е. Влияние азотных удобрений на свойства подстилки и живой напочвенный покров в сосновых насаждениях Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2015. № 1. С. 44–51.
Shapchenkova O.A., Kovaleva N.M., Ivanov V.V., Sobachkin R.S., Sobachkin D.S., Petrenko A.E. Effect of Nitrogen Fertilizers on the Ground Cover and the Properties of a Forest Floor in Pine Stands in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2015, no. 1, pp. 44–51. (In Russ.).
17. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы) / Федер. агентство лесн. хоз-ва, Междунар. ин-т приклад. систем. анализа. 2-е изд., доп. М., 2008. 886 с.
Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Nilsson S., Buluy Yu.I. *Tables and Models of Growth and Productivity of Forests of Major Forest Forming Species of Northern Eurasia (Standard and Reference Materials)*. Federal Agency of Forest Management, International Institute for Applied Systems Analysis. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, 2008. 886 p. (In Russ.).
18. Costa E.A., Finger C.A.G., Fleig F.D. Modelagem do Espaço de Crescimento para Araucária = Modelling Growing Space for Araucaria. *Ciência Florestal*, 2018, vol. 28, no. 2, pp. 725–734. (In Port.). <https://doi.org/10.5902/1980509832085>
19. Krejza J., Světlík J., Pokorný R. Spatially Explicit Basal Area Growth of Norway Spruce. *Trees*, 2015, vol. 29, pp. 1545–1558. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1236-x>
20. Linkevičius E., Kuliešis A., Röhle H., Schröder J., Aleinikovas M. The Impact of Competition for Growing Space on Diameter, Basal Area and Height Growth in Pine Trees. *Baltic Forestry*, 2014, vol. 20, no. 2(39), pp. 301–313.
21. O'Rourke S., Kelly G.E. Spatio-temporal Modelling of Forest Growth Spanning 50 Years – the Effects of Different Thinning Strategies. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, vol. 26, pp. 101–104. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.05.008>
22. Sharma R.P., Bílek L., Vacek Z., Vacek S. Modelling Crown Width–Diameter Relationship for Scots Pine in the Central Europe. *Trees*, 2017, vol. 31, pp. 1875–1889. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1593-8>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article