

**Связь изменчивости радиального прироста
сосны кедровой сибирской с биометрическими
и климатическими показателями**

Д.Е. Румянцев ^{1)*}, В.М. Сидоренков ²⁾, Е.С. Папулов ²⁾, Н.С. Воробьева ¹⁾

¹⁾ Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²⁾ Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, Россия, 141202, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 15

* Адрес для переписки: dendro15@list.ru

Реферат. Сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour) является важным эдификатором темнохвойных лесов Западной Сибири. Данный вид имеет значимую лесохозяйственную роль, не менее значимы формируемые им экосистемные функции. Оценочный прогноз его состояния в связи с потенциальными изменениями климата возможно дать с учетом анализа ростовых реакций вида на меняющиеся от года к году погодные условия. Для этой цели пригодны данные изменчивости годовых колец, что в свою очередь ставит задачу более глубокого анализа закономерностей изменчивости прироста сосны кедровой сибирской в лесохозяйственном и лесоэкологическом аспекте. Традиционные методы дендроклиматического анализа, методически сформировавшиеся в связи с задачей реконструкции климатов прошлых эпох, не полностью адекватны задачам анализа годовых колец в лесоводственных целях. В представленной статье приводятся результаты исследования изменчивости годовых колец на материале хронологии, полученной для древостоя сосны кедровой сибирской из типичных условий произрастания южнотаежных лесов Западной Сибири. Проанализированы общие закономерности изменчивости радиального прироста, влияние климатических факторов на формирование прироста, связь дендрохронологических показателей и биометрических показателей учетных деревьев. Разные методы дендроклиматического анализа дали сопоставимые результаты. Выявлено отрицательное влияние повышенных температур мая, сниженной месячной суммы осадков мая на рост сосны кедровой сибирской. Одновременно с этим зафиксирован выраженный положительный тренд в изменчивости среднемесячных температур мая. Таким образом, реальна угроза ухудшения состояния кедровых лесов исследуемого региона по мере изменения климата в сторону большей засушливости, что в свою очередь определяет актуальность дальнейших более глубоких исследований данного вопроса.

Ключевые слова. Дендрохронология, дендроклиматология, сосна кедровая сибирская, биоинформационные технологии.

Relationship of the variability of the radial growth of siberian stone pine with biometric and climatic indicators

D.E. Rumyantsev^{1)*}, *V.M. Sidorenkov*²⁾, *E.S. Papulov*²⁾, *N.S. Vorobyova*¹⁾

¹⁾ Mytisci branch of Bauman State Technical University (National Research University), 1, Institutskaya pervaya str., 141005, Moscow region, Mytishchi, Russian Federation

²⁾ All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, 15, Institutskaya str., 141202, Moscow region, Pushkino, Russian Federation

* Correspondence address: *dendro15@list.ru*

Abstract. Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) is an important edifier of the dark coniferous forests of Western Siberia. This species has a significant forestry role, the ecosystem functions formed by it are no less significant. An estimated forecast of its condition in connection with potential climate changes can be given taking into account the analysis of the growth reactions of this species to changing weather conditions from year to year. For this goal, data of the variability of annual rings are appropriate, and this make actual the task of a more in-depth analysis of the patterns of variability in the radial growth of this species in the interest's forestry and forest-ecology. Traditional methods of dendroclimatic analysis, methodically formed in connection with the task of reconstructing the climates of past eras, are not fully adequate to the tasks of analyzing annual rings for forestry purposes. This article presents the results of a study of the variability of annual rings based on the chronology obtained for the Siberian stone pine stand from typical growing conditions of the southern taiga forests of Western Siberia. The general patterns of variability of radial growth, the influence of climatic factors on the formation of growth, the relationship of dendrochronological indicators and biometric indicators of accounting trees are analyzed. Different methods of dendroclimatic analysis gave comparable results. The negative influence of elevated temperatures in May, reduced monthly precipitation in May on the growth of Siberian cedar pine was revealed. At the same time, a pronounced positive trend was recorded in the variability of average monthly temperatures in May. Thus, there is a real threat of deterioration of the Siberian pine forests of the studied region as the climate changes towards greater aridity, which in turn determines the relevance of further in-depth studies of this issue.

Keywords. Dendrochronology, dendroclimatology, Siberian stone pine, bioinformatics technologies.

Введение

Величина радиального прироста является интегральным показателем, который в разной степени коррелируется с показателями продуктивности, а

также характеристиками состояния организма растения (например, устойчивостью к воздействию какого-либо рода факторов). С практической точки зрения такая ситуация имеет и положительные, и отрицательные последствия. С одной стороны, комплексность показателя означает, что его изменчивость может быть использована для получения данных об изменчивости большого числа параметров: биометрических, физиологических, экологических. С другой стороны, встает проблема сепарирования информации, разделения воздействий разного рода, осложняющаяся эффектами взаимодействия факторов, которые могут быть аддитивными, кумулятивными и антагонистическими. Разные типы дендрохронологических показателей могут с разной степенью точности формировать алгоритмы идентификации биометрических признаков древесных растений. Еще одним важным аспектом анализа изменчивости ширины годичных колец является возможность использования их для прогнозирования реакции лесных экосистем на глобальное изменение климата (Соломина и др., 2017; Чендев и др., 2016; Matveev, 2017).

Целью настоящего исследования было изучение закономерностей изменчивости радиального прироста в старовозрастном древостое сосны кедровой сибирской в таежной зоне Тюменской области и выявление отдельных аспектов их экологической обусловленности. Актуальность выполненных исследований в первую очередь связана с необходимостью формирования вспомогательных методик для решения конкретных лесоводственных и лесоустроительных исследовательских задач, а также с совершенствованием методов экологической экспертизы состояния деревьев и насаждений и прогноза их реакции на глобальное изменение климата.

Материал и методы исследования

В наших расчетах были задействованы данные по пробной площади (ПП), заложенной сотрудниками Сибирской лесной опытной станции (ЛОС) в насаждении сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour). Использовались стандартные лесоустроительные методики (Анучин, 1982). В 2020 году была заложена пробная площадь, располагающаяся в типичных лесорастительных условиях южно-таежной зоны Тюменской области на территории Уватского лесничества, Уватского участкового лесничества (квартал 148, выдел 42). Тип леса – кедровник зеленомошно – ягодниковый. Состав древостоя 6Кедр2Ель2Пихта ед. Берёза. Состав подлеска: рябина, шиповник, малина, черемуха, карликовая ива. Состав подроста: 8Пихта1Ель1Кедр ед. Береза, Сосна. Состав живого напочвенного покрова: костяника, сфагнум, кислица, хвощ, осока. Бонитет древостоя II, разряд высот III. Количество учетных деревьев 21 шт. На пробной площади отмечено большое количество деревьев с ядровой гнилью (с деревьев, пораженных гнилью более чем на 50% по радиусу, отбор ядер не проводился), наличие двухвершинных деревьев и с механическими повреждениями от колотушек (неконтролируемая заготовка кедрового ореха). Средний возраст кедр 134 года. Количество подроста кедр 333 шт. на га.

Сводная таблица учетных деревьев ПП №1 представлена в табл. 1.

Таблица 1. Сводная таблица учетных деревьев ПП № 1

Table 1. Summary table of accounting trees of sample plot No. 1

№ Учетного дерева	Высота, м	Диаметр, см	Класс роста по Крафту	Место отбора кернов	Примечание
1	26.5	76	3	Запад	Двухвершинное
2	29	68	3	Запад	Двухвершинное
3	27	66	3	Запад	Двухвершинное
4	25.5	70	3	Запад	Одновершинное
5	28.5	68	3	Запад	Двухвершинное
6	23.5	48	2	Север	Одновершинное
7	28	54	3	Запад	Одновершинное
8	27	68	3	Запад	Одновершинное
9	25	62	3	Север	Одновершинное
10	29	62	3	Запад	Одновершинное
11	28	51	3	Запад	Одновершинное
12	25	68	3	Запад	Двухвершинное
13	24	54	3	Восток	Одновершинное
14	25	64	3	Север	Одновершинное
15	29	62	3	Запад	Двухвершинное
16	23.5	48	3	Запад	Одновершинное
17	29	66	3	Юг	Одновершинное
18	26	56	3	Юг	Одновершинное
19	26.5	62	3	Юг	Одновершинное
20	30	62	2	Север	Одновершинное
21	30	62	2	Восток	Одновершинное

Методика работ была подробно рассмотрена и обоснована ранее (Румянцев, 2010). С каждого учетного дерева сосны кедровой сибирской отбирали по одному керну на высоте 1.3 м с помощью возрастного бура Пресслера. Керны помещались в бумажные пакеты специальной формы, подписывались и направлялись в лабораторию. Измерения ширины годичных колец велось с помощью прибора Lintab-5 с точностью до 0.01 мм, перекрестная датировка с целью контроля за правильностью измерений велась с помощью программы Tsap-Win (Version 4.82b2) (Пальчиков, Румянцев, 2010). Графический и статистический анализ данных проводился с помощью табличного процессора Microsoft Excel 2010.

Результаты исследования и их обсуждение

Общие закономерности изменчивости прироста

Ряды динамики индексов прироста для древостоя приведены на рис. 1. Ширина годичного кольца непостоянна, как видно из рис. 1, варьирует у разных учетных деревьев и для разных лет, однако годы экстремального увеличе-

ния и уменьшения прироста у деревьев в целом совпадают. Все временные ряды имеют разную длину, что связано как с наличием ядровых гнилей, так и с разным возрастом учетных деревьев. Возраст наиболее старого учетного дерева составляет не менее 179 лет (с учетом высоты отбора керна 1.3 м), а в реальности он больше. Таким образом, класс возраста исследованного древостоя может быть оценен как «более ста лет».

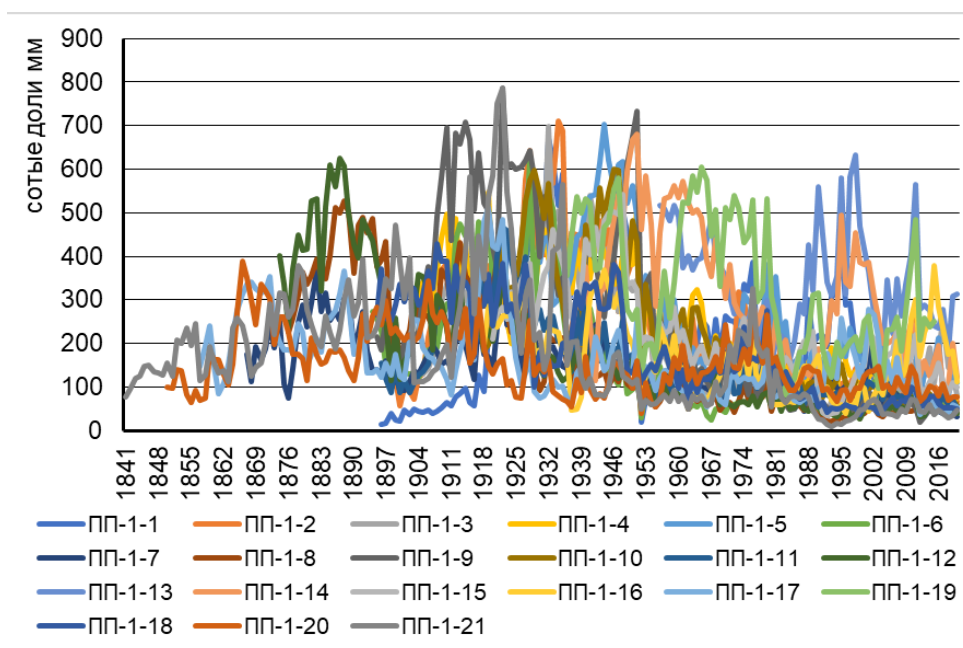


Рисунок 1. Динамика ширины годичного кольца у учетных деревьев по годам

Figure 1. Annual ring width dynamics of the of accounting trees by years

Обобщенный временной ряд для древостоя приведен на рис. 2. Наличие пика прироста в районе 1922 г., вероятно, связано с достижением высоты 1.3 м значительным числом молодых деревьев, для которых характерна большая величина годичного кольца. Наиболее старое дерево в выборке (№ 21) сформировало первое зафиксированное кольцо в 1841 году (рис. 4, см. ПП-1-21). Динамика ширины годичного кольца у данного дерева отражена на рис. 3.

Обращает на себя внимание аномально высокий радиальный прирост в 1920-х гг. XX века. Видимо, произошло разрушение старовозрастного древостоя и резкое улучшение светового питания у уцелевшего дерева данной возрастной когорты. Затем, вероятно, начался интенсивный рост подроста, формирование новой возрастной когорты исследуемого древостоя. Динамику прироста у трех наиболее старых учетных деревьев в исследуемом древостое отражает рис. 4.

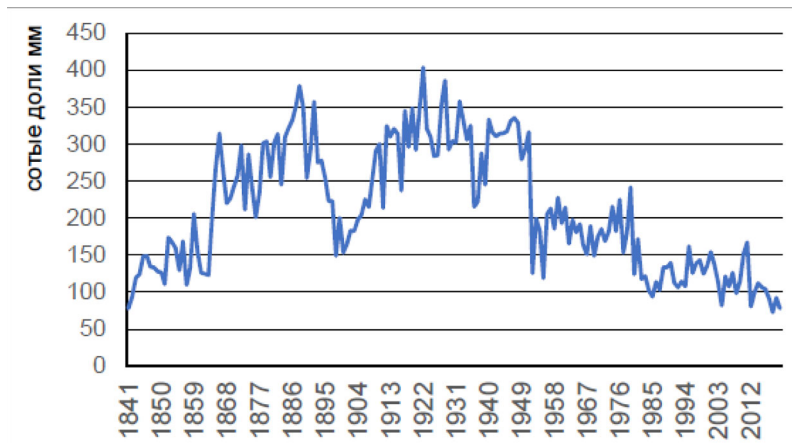


Рисунок 2. Динамика ширины годичного кольца в древостое
Figure 2. Growth ring width dynamics in the forest stand

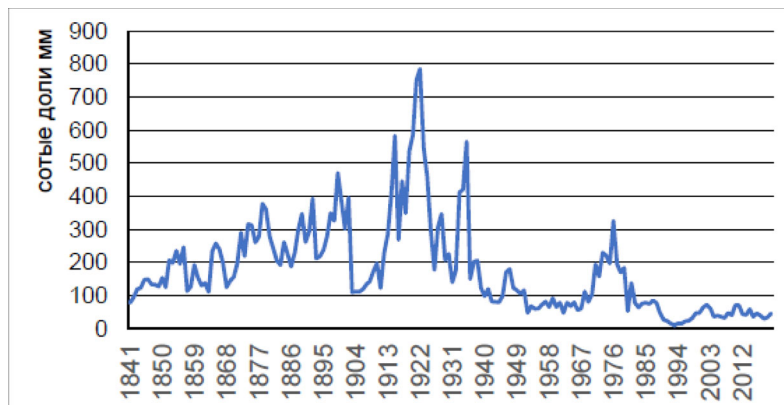


Рисунок 3. Динамика ширины годичного кольца у учетного дерева № 21
Figure 3. Growth ring width dynamics of the accounting tree No. 21

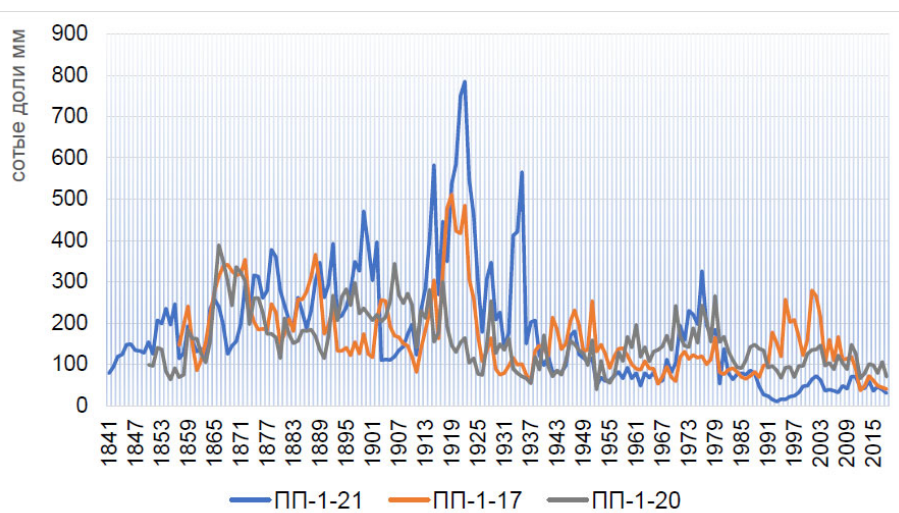


Рисунок 4. Динамика ширины годичного кольца у трех наиболее старых учетных деревьев
Figure 4. Annual ring width dynamics of the three oldest accounting trees

Как видно из рис. 4 динамика радиального прироста у отдельных деревьев может как совпадать в определенные периоды (последовательное увеличение ширины годичного кольца), так и не совпадать. Это обусловлено спецификой проявления фактора внутривидовой и межвидовой конкуренции в древостое: у каждого индивидуального дерева свое конкурентное окружение, процессы конкуренции протекают по-разному, что и отражается в динамике прироста. Гибель соседнего дерева улучшает световое и водное питание, что ведет к последовательному увеличению прироста в течении нескольких лет, аналогично эффектом конкуренции являются периоды угнетения (снижения ширины годичного кольца) в масштабе десятилетия (десятилетий) с последующим возвращением величины прироста на прежний уровень. Эффекты конкуренции нивелируются при расчете средней для учетных деревьев хронологии. Поэтому целесообразно также рассмотреть динамику ширины годичного кольца в древостое в последние десятилетия роста (когда в выборке для расчета годичного радиального прироста участвуют все учетные деревья). График, отражающий ее, приведен на рис. 5.

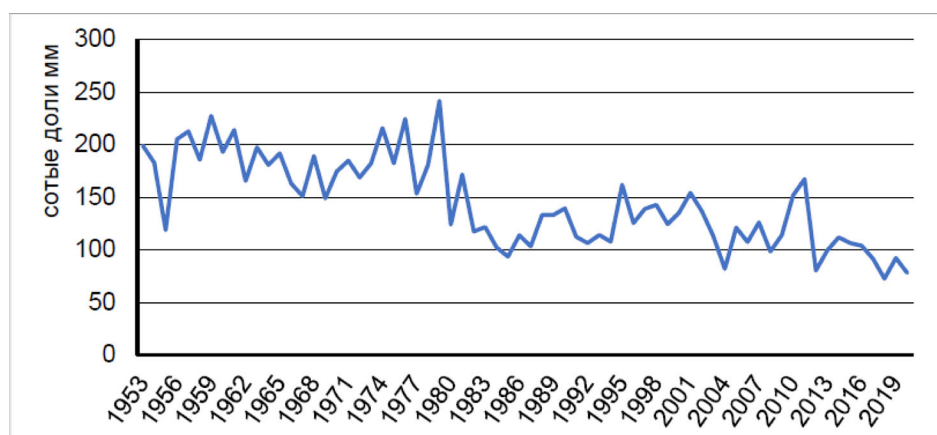


Рисунок 5. Динамика радиального прироста в исследуемом древостое (для всех исследованных учетных деревьев) за последние 67 лет

Figure 5. Radial growth dynamics of the studied forest stand (for all studied accounting trees) for the last 67 years

Анализируя динамику радиального прироста (рис. 5) на исследуемом временном интервале, можно установить отсутствие выраженной цикличности в изменчивости радиального прироста. Наличие цикличности могло бы служить целям анализа интенсивности семеношения (которое отличается цикличностью), прогноза всплеск численности хвоегрызущих вредителей (которые иногда цикличны), состояния насаждений, наступления пожароопасных сезонов и др. (Румянцев, 2010).

Ярко выраженные минимумы ширины годичного кольца наблюдаются в 1955, 1985, 2004, 2012, 2018 гг. При этом отмечается последовательное уменьшение ширины годичного кольца в 1982, 1983, 1984 и 1985 гг., что может служить индикатором развития всплески численности хвоегрызущих вредителей (например, сибирского шелкопряда), вызывающих последовательное снижение прироста в течение нескольких лет.

Влияние климатических факторов на изменчивость прироста

Климатическая составляющая в погодичной изменчивости прироста выделялась путем вычисления индексов прироста, которые рассчитывались, как отношение ширины годичного кольца в данном году к средней ширине годичного кольца за последние 5 лет. Дендроклиматический анализ проводился также методом климаграмм (Румянцев, 2010). В расчетах были использованы многолетние данные метеостанции г. Тюмень. Расположение метеорологической станции в Тюмени (Тюменская область, Россия): широта 57.12°, долгота 65.43°, высота над уровнем моря 102 м. Были использованы временные ряды по таким метеопараметрам как среднемесячные температуры, максимальные суточные месячные суммы осадков, месячные суммы осадков (получены на сайте http://www.pogodaiklimat.ru/history/28367_3.htm). Длина рядов и периоды отличались в зависимости от поставленной задачи.

На основе временных рядов (рис. 6) могут быть выделены годы, для которых у деревьев наблюдалось чрезвычайно ярко выраженное синхронное формирование экстремально узких годичных колец: 1955, 1962, 1980, 2004, 2012 гг. Обобщенная для древостоя средняя индексированная хронология приведена на рис. 7, по которому достаточно легко выделить годы экстремально низкого прироста (менее 0.7): 1955, 1980, 1982, 2004, 2012 гг.

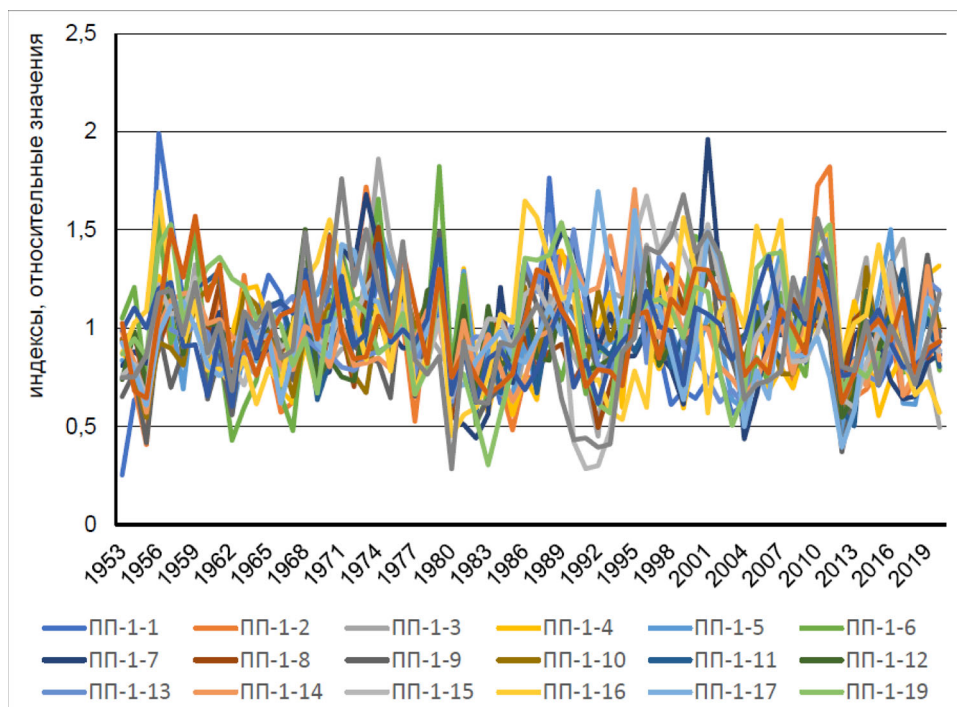


Рисунок 6. Динамика индексов радиального прироста у исследуемых учетных деревьев

Figure 6. Radial growth indices dynamics of the studied accounting trees

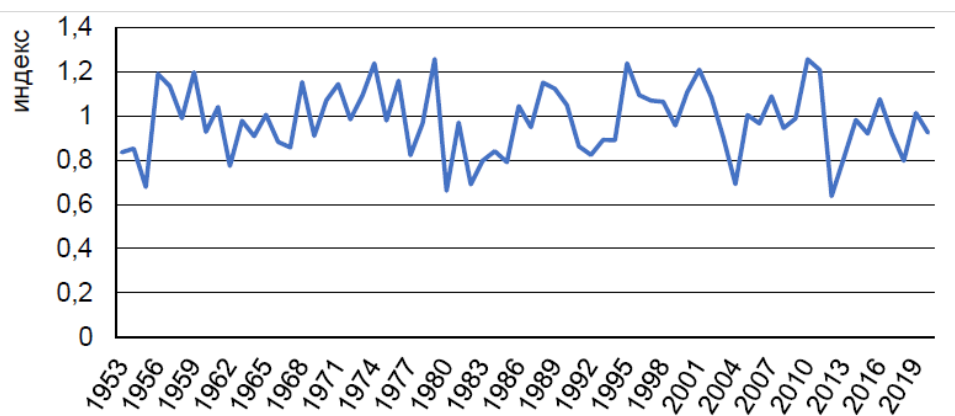


Рисунок 7. Индексируемая хронология, характеризующая динамику индексов радиального прироста в исследуемом древостое

Figure 7. Indexed chronology characterizing the radial growth indices dynamics of the studied forest stand

Обобщая результаты выделения минимумов прироста на основании рис. 5, 6, 7, следует выделить годы с ярко выраженными минимумами прироста, выявляемые тремя отличающимися способами: анализ динамики средней ширины годичного кольца, анализ синхронности формирования минимальных значений индекса радиального прироста (на основе визуального анализа хронологий), анализ динамики минимальных значений индексов прироста. В итоге минимумы прироста были выделены тремя способами, и затем были отобраны общие для трех выборок календарные годы: 1955, 2004, 2012. Представляет интерес анализ погодной обстановки этих лет методом климаграмм (Lovelius, 1997; Румянцев, 2010).

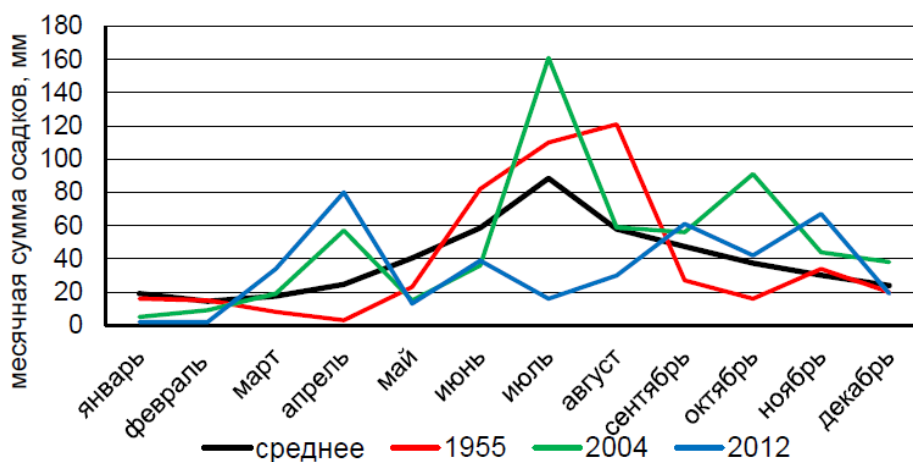


Рисунок 8. Сопоставление средних месячных сумм осадков для лет минимального прироста со среднеголетними показателями за период 1936-2019 гг.

Figure 8. Comparison of average monthly precipitation for years of minimum growth with long-term averages for the period 1936-2019

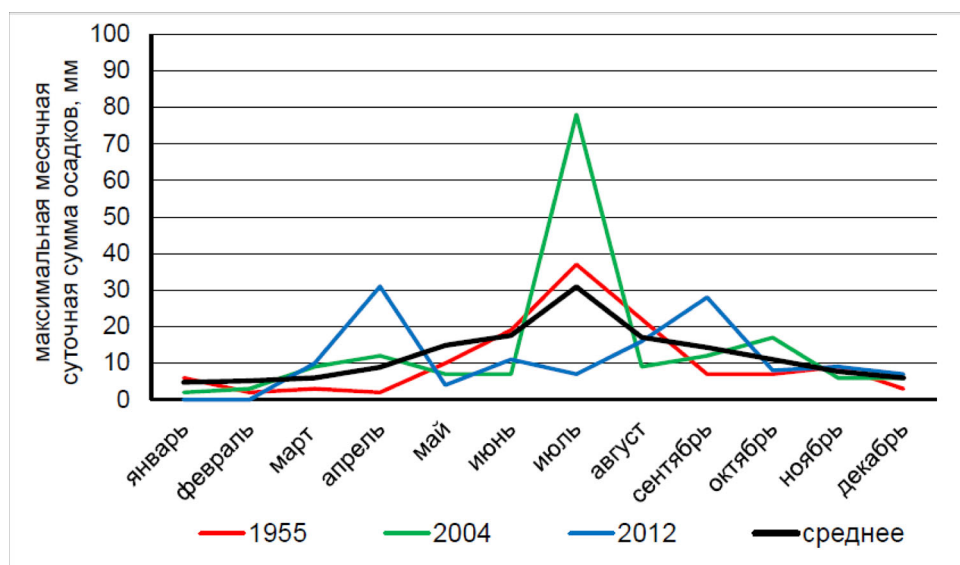


Рисунок 9. Сопоставление максимальных месячных суточных сумм осадков для лет минимального прироста со среднемноголетними показателями за период 1936-2019 гг.

Figure 9. Comparison of the maximum monthly daily precipitation for the years of minimum growth with long-term averages for the period 1936-2019

Анализируя климаграммы (рис. 8, 9), возможно выделить единственный общий признак характерный для 1955, 2004, 2012 гг. – это малое (ниже средней месячной суммы осадков – на 50% и более) количество осадков в мае, что говорит об отрицательном эффекте влияния майских засух на величину прироста.

Сопоставление климаграмм, представленных на рис. 10, убедительно демонстрирует отрицательное влияние на формирование прироста древесины высоких температур воздуха в мае и в меньшей степени в июле. Значительное повышение температуры, как правило, связано с высоким уровнем солнечной инсоляции, ростом интенсивности транспирации и ростом водного дефицита в организме растения. Обнаруженный эффект демонстрирует отрицательные предпосылки для прогноза реакции сосны кедровой сибирской исследуемого региона на потепление климата.

Альтернативой и дополнением методу климаграмм является корреляционный анализ, традиционно широко применяющийся при сопоставлении временных рядов разной природы в целях выявления сопряженности колебаний их значений и построения гипотез о характере влияния независимой переменной на зависимую. В дендроклиматических исследованиях независимой переменной всегда полагается климатический фактор (метеопараметр), хотя с точки зрения лесоведения это не всегда очевидно. Результаты корреляционного анализа отражают данные табл. 2, 3.

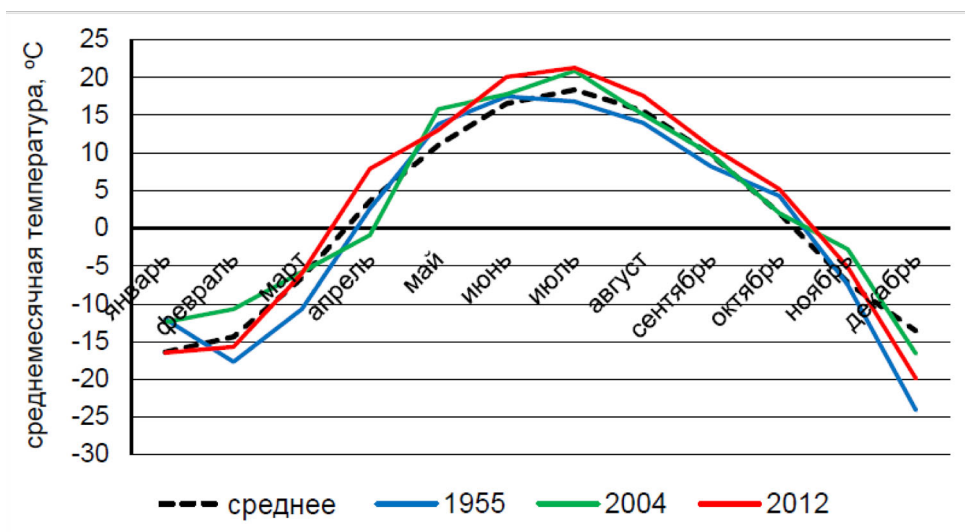


Рисунок 10. Сопоставление среднемесячной температуры реперных лет минимального прироста со среднемноголетними показателями за период 1936-2019 гг.

Figure 10. Comparison of the reference years average monthly temperature of minimum growth with the average long-term indicators for the period 1936-2019

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции между рядами индексов радиального прироста и рядами метеопараметров в календарный год формирования годичного кольца

Table 2. Values of the correlation coefficients between the radial growth indices series and the meteorological parameters series in the calendar year of the annual ring formation

Месяц	Метеопараметр		
	Среднемесячная температура, °С	Максимальная месячная суточная сумма осадков, мм	Месячная сумма осадков, мм
Январь	-0.14	0.16	0.12
Февраль	0.02	0	0.28
Март	0.24	-0.13	0.11
Апрель	-0.04	-0.11	-0.14
Май	-0.02	0.02	0.02
Июнь	-0.10	-0.18	0.14
Июль	-0.06	-0.02	-0.18
Август	0.07	0.24	-0.13
Сентябрь	0.05	0	0.05
Октябрь	-0.10	-0.30	-0.11
Ноябрь	-0.08	0.12	-0.03
Декабрь	0.05	0.25	0.05

*достоверные значения коэффициентов корреляции выделены жирным шрифтом

Таблица 3. Значения коэффициентов корреляции между рядами индексов радиального прироста и рядами метеопараметров в год, предшествующий календарному году формирования годичного кольца

Table 3. Correlation coefficients values between the radial growth indices series and the meteorological parameters series in the year preceding the calendar year of the annual ring formation

Месяц	Метеопараметр		
	Среднемесячная температура, °С	Максимальная месячная суточная сумма осадков, мм	Месячная сумма осадков, мм
Январь	-0.18	-0.09	0.05
Февраль	0.04	-0.01	-0.09
Март	0	0.08	-0.11
Апрель	0.05	-0.01	-0.09
Май	-0.02	-0.24	0.04
Июнь	0.11	0.08	-0.31
Июль	-0.20	0.20	0.07
Август	-0.19	0.03	0.22
Сентябрь	-0.18	-0.03	0.03
Октябрь	0.10	-0.03	-0.22
Ноябрь	0.11	-0.14	0.09
Декабрь	-0.14	-0.07	0.30

*достоверные значения коэффициентов корреляции выделены жирным шрифтом

Анализировались временные ряды на интервале 1953-2019 гг., когда в выборке присутствовало более 50% учетных деревьев. Здесь находится 67 значений каждого временного ряда и таким образом число степеней свободы равно 65. При числе степеней свободы 65 и уровне доверительной вероятности 0.05 достоверны значения коэффициентов корреляции от 0.24 и выше. В целом выполненный корреляционный анализ не позволяет выделить один-два наиболее значимых для прироста метеопараметра (лимитирующих фактора), что типично для насаждений в благоприятных условиях произрастания в центральных частях ареала вида. Просматривается слабый, но достоверный отрицательный эффект влияния на состояние деревьев засушливых условий в начале вегетационного сезона прошлого года, что можно связывать с заложением вегетативных и генеративных почек. При интродукции сосны кедровой сибирской в условиях Главного Ботанического сада им. Н.В. Цицины РАН также выявлен достоверный отрицательный эффект влияния майских засух на величину радиального прироста древесины (Румянцев, 2010).

В контексте прогноза реакции кедровых лесов на глобальное потепление имеет смысл рассмотреть тенденции многолетней динамики майских и июльских температур (рис. 11), так как по данным дендроклиматического анализа засушливые условия этих периодов создают предпосылки для плохого состояния сосны кедровой сибирской. Для расчёта линейных трендов была использована стандартная функция в программе Microsoft Excel.

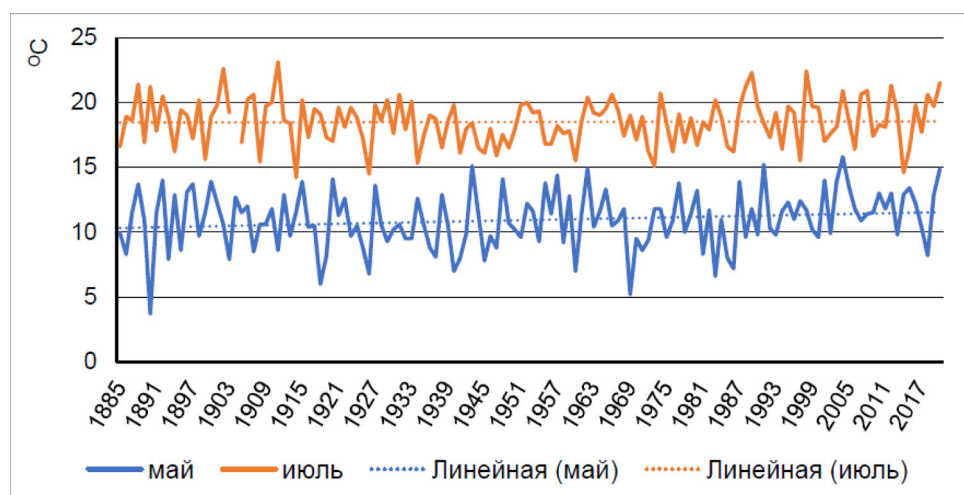


Рисунок 11. Динамика среднемесячных температур мая и июля и ее многолетние линейные тренды

Figure 11. Average monthly temperatures dynamics in May and July and its long-term linear trends

Как показывает анализ динамики температур мая и июля за период 1885-2021 гг., (136 лет) выраженного тренда к потеплению для температур июля не наблюдается, а для температур мая наблюдается слабый тренд, выражающийся в увеличении месячных температур к 2020 году на 2° С.

Связь дендрохронологических показателей с биометрическими признаками

Для анализа связи с биометрическими признаками были задействованы следующие показатели: средняя ширина годичного кольца за 5 лет; средняя ширина годичного кольца за 10 лет; среднее квадратическое отклонение за 10 лет; автокорреляция 1-го порядка за 10 лет; коэффициент вариации за 10 лет; значение индекса радиального прироста для 2020, 2019, 2018, 2017, 2016 гг. Исходные для анализа данные отражены в табл. 4. Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 5.

При числе степеней свободы 18 и уровне доверительной вероятности 0.05 достоверны значения коэффициентов корреляции от 0.44 и выше. Результаты анализа достаточно интересны.

Во-первых, естественно, что ряд показателей не являются полностью независимыми (как коэффициент вариации и среднее квадратическое отклонение) и поэтому сильно коррелируют между собой. Также естественны высокие корреляции между средней шириной годичного кольца за 5 лет и средней шириной годичного кольца за 10 лет.

Более интересно отсутствие связи между биометрическими показателями индивидуального дерева (высота и диаметр) и величиной радиального прироста (шириной годичного кольца). В контексте разработки биоинформационных матриц биометрических растений этот вывод важен. Радиальный прирост

выступает как самостоятельный индикатор, не дублирующий, а дополняющий традиционные таксационные характеристики при подеревной таксации леса.

Важным, аспектом проблемы является исследование связи индексов прироста в связи с изменчивостью биометрических признаков. Чтобы показать значение этого показателя необходимо предварительно раскрыть биологический смысл индекса прироста, его экофизиологическое значение с точки зрения индикации процессов, происходящих в организме дерева и «поведения» дерева в экосистеме.

Таблица 4. Дендрохронологические характеристики учетных деревьев ПП №1

Table 4. Dendrochronological characteristics of accounting trees of sample plots No. 1

номер	Прирост за 5 лет, сотые доли мм	Прирост за 10 лет, сотые доли мм	Среднеквадратическое отклонение, сотые доли мм	Коэффициент вариации, %	Автокорреляция первого порядка за 10 лет	Индекс прироста в 2020 году	Индекс прироста в 2019 году	Индекс прироста в 2018 году	Индекс прироста в 2017 году	Индекс прироста в 2016 году
1	49.80	57.30	15.92	27.79	0.74	0.86	1.05	0.98	1.04	0.83
2	67.20	97.50	62.42	64.02	0.44	0.98	0.82	0.74	0.63	0.99
3	159.20	147.10	52.32	35.57	0.02	0.50	0.83	0.83	1.45	1.32
4	58.40	66.10	19.88	30.08	0.27	1.32	1.27	0.95	0.87	0.75
5	123.00	129.20	44.36	34.33	0.15	0.89	0.93	0.61	0.62	1.50
6	59.80	64.30	16.82	26.16	-0.08	0.79	1.09	0.83	0.77	1.23
7	37.00	53.70	20.72	38.58	0.67	0.86	0.83	0.65	0.64	0.73
8	42.60	42.30	6.73	15.92	-0.24	0.99	0.85	0.90	0.93	1.24
9	53.40	45.70	13.84	30.29	0.19	0.96	1.37	0.97	1.16	1.34
10	57.40	57.80	14.29	24.72	-0.08	1.01	1.19	0.83	0.83	1.12
11	63.40	61.50	16.51	26.84	0.07	0.80	1.05	0.90	1.30	1.07
12	42.00	46.80	14.95	31.95	0.18	0.93	0.90	0.77	0.97	1.04
13	262.80	296.10	102.12	34.49	0.32	1.19	1.24	0.75	1.06	0.89
14	144.20	151.90	44.33	29.18	0.06	0.84	1.31	0.78	0.66	1.28
15	112.60	120.80	40.36	33.41	0.29	0.88	0.93	0.73	0.96	1.33
16	197.60	231.90	76.94	33.18	0.39	0.57	0.73	0.66	0.85	1.07
17	48.60	55.00	16.15	29.35	0.49	1.09	1.16	0.75	0.81	0.91
19		288.00	111.83	38.83	0.18					
18	53.00	62.60	14.35	22.93	0.65	0.92	0.86	0.81	0.80	0.92
20	81.60	87.80	19.34	22.03	0.32	0.93	0.90	0.77	1.15	0.94
21	39.20	44.70	11.90	26.62	0.44	1.17	0.94	0.71	0.88	1.01

Таблица 5. Результаты корреляционного анализа сопряженности изменчивости биометрических признаков учетных деревьев и дендрохронологических характеристик изменчивости их радиального прироста

Table 5. Correlation analysis results of contingency between the accounting trees biometric features variability and their radial growth dendrochronological variability characteristics

	R5	R10	СКО 10	Вар 10	Автокорр1	I2020	I2019	I2018	I2017	I2016	Высота	Диаметр
R5	1.00											
R10	0.99	1.00										
СКО10	0.92	0.95	1.00									
Вар 10	0.19	0.26	0.54	1.00								
Автокорр1	-0.09	0.00	0.07	0.30	1.00							
I 2020	-0.26	-0.21	-0.18	-0.07	0.15	1.00						
I2019	0.03	-0.01	-0.09	-0.21	-0.20	0.47	1.00					
I2018	-0.34	-0.40	-0.44	-0.36	-0.21	0.16	0.50	1.00				
I2017	0.16	0.06	-0.02	-0.27	-0.21	-0.26	0.05	0.49	1.00			
I2016	0.21	0.11	0.08	-0.07	-0.66	-0.44	0.02	-0.10	0.09	1.00		
Высота	-0.40	-0.40	-0.31	0.09	0.15	0.20	-0.27	-0.24	-0.03	-0.03	1.00	
Диаметр	-0.30	-0.32	-0.24	0.10	0.06	0.29	0.10	0.30	0.00	0.02	0.33	1.00
Класс роста по Крафту	0.19	0.19	0.26	0.27	0.06	-0.09	0.08	0.11	-0.03	0.03	-0.18	0.25

*достоверные значения коэффициентов корреляции выделены жирным шрифтом

Примечание. R5 – средняя ширина годичного кольца за 5 лет; R10 – средняя ширина годичного кольца за 10 лет; СКО10 – среднее квадратическое отклонение за 10 лет, Вар 10 – коэффициент вариации за 10 лет; Автокорр 10 – автокорреляция 1-го порядка за 10 лет; I2020-I2016 – значение индекса радиального прироста для 2020.

Эколого-генетическая модель В.А. Драгавцева (1995, 1996, 2000, 2003) описывающая закономерности изменчивости количественных признаков растений, утверждает следующую закономерность: при смене лимитирующего фактора внешней среды меняются число и спектр генов, детерминирующих среднюю величину и генетическую дисперсию признака. Спектр генов «под признаком» будет меняться от среды к среде (от одной экологической точки к другой и в одной точке от года к году). В рамках данной концепции индекс прироста выступает как количественный признак, формирование которого в каждый вегетационный сезон будет определяться разными локусами с разным вкладом каждого из них в формирование данного количественного признака. Таким образом, с точки зрения задач формирования биоинформационных матриц биометрических признаков древесных растений, индексы радиального прироста разных лет априори имеют разное значение в силу биологических, физиологических, экогенетических закономерностей.

Подтверждение данному факту мы наблюдаем на примере результатов корреляционного анализа, обобщенных в табл. 5. Индексы приростов разных лет демонстрируют разнообразие реакции по сопряженности с другими показателями, в том числе разнообразна сопряженность индексов приростов разных

лет. Интересен факт высокой достоверной автокорреляции 1-го порядка и индекса прироста 2016 г. (коэффициент корреляции -0.66). Биологически интерпретировать его трудно, но с точки зрения целей формирования архитектуры и алгоритмов функционирования биоинформационных матриц факт возможности таких корреляций необходимо принимать во внимание.

Заключение

Подводя итог данному этапу исследований, следует сделать вывод об отсутствии ясно выраженной циклической компоненты в изменчивости радиального прироста сосны кедровой сибирской в данном районе исследований, что, однако не исключает возможности влияния на прирост с низким удельным весом циклически меняющихся экофизиологических факторов эндогенного и экзогенного характера. Влияние климатических факторов слабо выражено по причине того, что лимитирующий прирост фактор часто меняется от года к году, что типично для насаждений вида в центральных частях ареала. Однако просматривается выраженный отрицательный эффект влияния на рост кедровых деревьев засушливых условий мая. Учитывая наличие тренда к росту майских температур, есть предпосылки прогнозировать ухудшение состояния кедровых лесов региона в грядущие десятилетия. Также важно, что анализ связи дендрохронологических показателей с биометрическими признаками древесных растений дает обнадеживающие результаты с точки зрения возможности формирования биоинформационных моделей формирования таксационных показателей на базе анализа изменчивости годовых колец.

Список литературы

- Анучин, Н.П. (1982) *Лесная таксация*, М., Лесная промышленность, 552 с.
- Драгавцев, В.А. (1995) Эколого-генетическая модель организации количественных признаков растений, *Сельскохозяйственная биология. Серия: биология растений*, № 5, с. 20-30.
- Драгавцев, В.А. (1996) Идентификация адаптивных полигенных систем у отдельных деревьев популяции хвойных пород, *Тезисы докладов международной научно-практической конференции*, Воронеж, с. 7
- Драгавцев, В.А. (2000) Некоторые новые фундаментальные подходы в экологической генетике растений, *Сельскохозяйственная биология*, № 1, с. 34-36.
- Драгавцев, В.А. (2003) *К проблеме генетического анализа полигенных количественных признаков растений*, СПб., ВИР, 35 с.
- Пальчиков, С.Б., Румянцев, Д.Е. (2010) Современное оборудование для дендрохронологических исследований, *Вестник Московского Государственного Университета Леса – Лесной вестник*, № 3 (72), с. 46-51.
- Румянцев, Д.Е. (2010) *История и методология лесоводственной дендрохронологии*, М., МГУЛ, 137 с.
-

Соломина, О.Н., Бушуева, И.С., Долгова, Е.А., Золотокрылин, А.Н., Кузнецова, В.В., Лазукова, Л.И., Ломакин, Н.А., Мацковский, В.В., Матвеев, С.М., Михайлов, А.Ю., Михайленко, В.Н., Пожидаева, Д.С., Румянцев, Д.Е., Сакулина, Г.А., Семенов, В.А., Хасанов, Б.Ф., Черенкова, Е.А., Чернокульский, А.В. (2017) *Засухи Восточно-Европейской равнины по гидрометеорологическим и дендрохронологическим данным*, СПб., Нестор-История, 360 с.

Чендев, Ю.Г., Лебедева, М.Г., Матвеев, С.М., Петин, Л.Н., Долгих, А.В., Смирнова, Л.Г., Соловьев, А.Б., Кухарук, Н.С., Крымская, О.В., Нарожная, А.Г., Терехин, Е.А., Березуцкий, В.Д., Голотвин, А.Н., Сарапулкин, В.А., Сарапулкина, Т.В., Федюнин И.В., Польшина, М.А., Митрияйкина, А.М., Калугина, С.В., Полякова, Т.А., Белеванцев, В.Г., Вагулин, И.Ю., Толстопятова, О.С., Бобрунова, Д.А., Тимашук, Д.А., Дудин, Д.И., Дудина, Е.В., Тарубарова, А.Н., Смирнов, Г.В., Куарук, С.А., Тимошенко, А.И., Тимоов, И.С. (2016) *Почвы и растительность юга Среднерусской возвышенности в условиях меняющегося климата*, Белгород, Константа, 326 с.

Lovelius, N.V. (1997) *Dendroindication of natural processes and antropogenic influences*, St. Peterburg, 320 p.

Matveev, S.M., Chendev, Yu.G., Lupo, A.R., Hubbart, J.A., Timashchuk, D.A. (2017.) Climatic changes in the East-European forest-steppe and effects on Scots pine productivity, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 174, no. 1, pp. 427-443.

References

Anuchin, N.P. (1982) *Lesnaya taksaciya* [Forest inventory], Lesnaya promyshlennost', Moscow, Russia, 552 p.

Dragavcev, V.A. (1995) *E`kologo-geneticheskaya model` organizacii kolichestvenny`x priznakov rastenij* [Ecological and genetic model of the organization of quantitative characteristics of plants], *Sel`skoxozyajstvennaya biologiya. Seriya: biologiya rastenij*, no. 5, pp. 20-30.

Dragavcev, V.A. (1996) *Identifikaciya adaptivny`x poligenny`x sistem u otdel`ny`x derev`ev populyacii xvojny`x porod* [Identification of adaptive polygenic systems in individual trees of the coniferous population], *Tezisy` dokladov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, Voronezh, Russia, p. 7.

Dragavcev, V.A. (2000) *Nekotory`e novy`e fundamental`ny`e podhody` v e`kologicheskoy genetike rastenij* [Some new fundamental approaches in ecological plant genetics], *Sel`skoxozyajstvennaya biologiya*, no. 1, pp. 34-36.

Dragavcev, V.A. (2003) *K probleme geneticheskogo analiza poligenny`x kolichestvenny`x priznakov rastenij* [On the problem of genetic analysis of polygenic quantitative traits of plants], VIR, Saint Petersburg, Russia, 35 p.

Pal`chikov, S.B., Rumyantsev, D.E. (2010) *Sovremennoe oborudovanie dlya dendroxronologicheskix issledovanij* [Modern equipment for dendrochronological research], *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Lesa. Lesnoj*

vestnik, no. 3 (72), pp. 46-51.

Rumyanцев, D.E. (2010) *Istoriya i metodologiya lesovodstvennoj dendroxronologii* [History and methodology of forest dendrochronology], MGUL, Moscow, Russia, 137 p.

Solomina, O.N., Bushueva, I.S., Dolgova, E.A., Zolotokry`lin, A.N., Kuzneczova, V.V., Lazukova, L.I., Lomakin, N.A., Maczkovskij, V.V., Matveev, S.M., Mixajlov, A.Yu., Mixajlenko, V.N., Pozhidaeva, D.S., Rumyanцев, D.E., Sakulina, G.A., Semenov, V.A., Xasanov, B.F., Cherenkova, E.A., Chernokul`skij, A.V. (2017) *Zasuxi Vostochno-Evropejskoj ravniny` po gidrometeorologicheskim i dendroxronologicheskim dannym* [Droughts of the Eastern European plain according to hydrometeorological and dendrochronological data], Nesto-Istoriya, Saint Petersburg, Russia, 360 p.

Chendev, Yu.G., Lebedeva, M.G., Matveev, S.M., Petin, L.N., Dolgix, A.V., Smirnova, L.G., Solov`ev, A.B., Kuxaruk, N.S., Kry`mskaya, O.V., Narozhnaya, A.G., Terexin, E.A., Berezuczkij, V.D., Golotvin, A.N., Sarapulkin, V.A., Sarapulkina, T.V., Fedyunin, I.V., Pol`shina, M.A., Mitriyajkina, A.M., Kalugina, S.V., Polyakova, T.A., Belevancev, V.G., Vagulin, I.Yu., Tolstopyatova, O.S., Bobrunova, D.A., Timashuk, D.A., Dudin, D.I., Dudina, E.V., Tarubarova, A.N., Smirnov, G.V., Kuaruk, S.A., Timoshenko, A.I., Timoov, I.S. (2016) *Pochvy` i rastitel`nost` yuga Srednerusskoj vozvy`shennosti v usloviyax menyayushhegosya klimata* [Soils and vegetation of the South of the Central Russian upland in a changing climate], Konstanta, Belgorod, Russia, 326 p.

Lovelius, N.V. (1997) *Dendroindication of natural processes and antropogenic influences*, St. Peterburg, 320 p.

Matveev, S.M., Chendev, Yu.G., Lupo, A.R., Hubbart, J.A., Timashchuk, D.A. (2017.) Climatic changes in the East-European forest-steppe and effects on Scots pine productivity, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 174, no. 1, pp. 427-443.

Статья поступила в редакцию (Received): 18.06.2021 г.;

Статья доработана после рецензирования (Revised): 02.02.2022 г.;

Статья принята к публикации (Accepted): 10.04.2022 г.

Для цитирования / For citation:

Румянцев, Д.Е., Сидоренков, В.М., Папулов, Е.С., Воробьева, Н.С. (2022) Связь изменчивости радиального прироста сосны кедровой сибирской с биометрическими и климатическими показателями, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXIII, № 1-2, с. 20-37, doi: 10.21513/0207-2564-2022-1-2-20-37.

Rumyanцев, D.E., Sidorenkov, V.M., Papulov, E.S., Vorobyova, N.S. (2022) Relationship of the variability of the radial growth of siberian stone pine with biometric and climatic indicators, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXIII, no. 1-2, pp. 20-37, doi: 10.21513/0207-2564-2022-1-2-20-37.
