



**Анализ региональных кривых роста *Picea obovata* Ledeb.  
на Южном Урале**

**Григорий И. Ложкин**<sup>1,2</sup>✉, lozhkin.grig@gmail.com; ORCID: 0009-0004-0962-3658

**Андрей А. Григорьев**<sup>3</sup>, grigoriev.a.a@ipae.uran.ru; ORCID: 0000-0002-7446-0654

**Сергей О. Вьюхин**<sup>3</sup>, sergey.vyuhin@mail.ru; ORCID: 0000-0001-7173-4878

**Нелли А. Чижикова**<sup>1</sup>, nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru; ORCID: 0000-0002-9969-9207

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29, г. Москва, 119017, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. 8 Марта, 202, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация

Характеристики колец деревьев зависят от различных факторов. Как правило, в ходе анализа влияния внешних факторов производят удаление вклада возраста в радиальный прирост. Наряду с индивидуально подобранными по каждому дереву зависимостями, для этого шага используют региональных кривые роста, под которыми понимают эмпирически определенные кривые, описывающие связь между возрастом и характеристиками годичных колец на некоторой территории. Целью данной работы обозначено выявление различий в радиальном приросте ели сибирской на верхней границе распространения на Южном Урале с помощью анализа региональных кривых роста. Суммарно в анализе использованы измерения прироста 989 деревьев. Ожидаемая ширина годичных колец ели сибирской на Южном Урале описана с помощью кривой Хугерсхоффа. Исследованы популяции ели на трех хребтах: Нары, Зигальга и Таганай. Так как в настоящее время происходит расселение ели сибирской на территории горной тундры, не на всех высотных уровнях удалось оценить параметры региональных кривых. Наибольшее значение ожидаемого максимального прироста (от 2.1 до 2.7 миллиметров) отмечено на нижних высотных уровнях юго-восточного склона в перевале между горой Поперечная и горой Круглая (хребет Зигальга), что может быть объяснено благоприятными условиями инсоляции и не высокой скоростью ветра, по сравнению с хребтом Таганай.

**Ключевые слова:** Южный Урал, региональные кривые роста, радиальный прирост, ель сибирская

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИЭРиЖ УрО РАН № 122021000083-7.

**Конфликт интересов:** коллектив авторов заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Анализ региональных кривых роста *Picea obovata* Ledeb. на Южном Урале / Г. И. Ложкин, А. А. Григорьев, С. О. Вьюхин, Н. А. Чижикова // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 69–87. – Библиогр.: с. 83–87 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/5>.

Поступила 23.12.2025. Пересмотрена 29.01.2026. Принята 15.03.2026. Опубликована онлайн 27.03.2026.

*Article*

**Analysis of regional growth curves of *Picea obovata* Ledeb.  
in the Southern Urals**

**Grigory I. Lozhkin**<sup>1,2</sup>✉, lozhkin.grig@gmail.com; ORCID: 0009-0004-0962-3658

**Andrey A. Grigoriev**<sup>3</sup>, grigoriev.a.a@ipac.uran.ru; ORCID: 0000-0002-7446-0654

**Sergey O. Vyukhin**<sup>3</sup>, sergey.vyuhin@mail.ru; ORCID: 0000-0001-7173-4878

**Nelli A. Chizhikova**<sup>1</sup>, nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru; ORCID: 0000-0002-9969-9207

<sup>1</sup>*Kazan (Volga Region) Federal University, Kremlevskaya Street, 18, Kazan, 420008, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Institute of Geography, RAS, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 8th March Street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation*

**Abstract**

Tree ring characteristics depend on various factors. Typically, when analyzing the influence of external factors, the contribution of age to radial increment is removed. Along with individually fitted curves for each tree, regional growth curves are used for this step. Regional growth curves are empirically determined curves describing the relationship between age and tree ring characteristics in a given area. The aim of this study is to identify differences in radial increment of Siberian spruce at the upper limit of its distribution in the Southern Urals by analyzing regional growth curves. In total, growth measurements from 989 trees were used in the analysis. The expected tree ring width of Siberian spruce in the Southern Urals is described using the Hegershoff curve. Spruce populations were studied on three ridges: Nary, Zigalga, and Taganay. Since the Siberian spruce is currently spreading across the alpine tundra, it was not possible to estimate the parameters of the regional curves at all altitude levels. The highest value of the expected maximum increase (from 2.1 to 2.7 millimeters) was noted at the lower altitude levels of the south-eastern slope in the pass between Mount Poperechnaya and Mount Kruglaya (Zigalga ridge), which can be explained by favorable insolation conditions and low wind speed, compared to the Taganay ridge.

**Keywords:** *Southern Urals, regional growth curves, radial increment, Siberian spruce*

**Funding:** The study was performed under the state assignment of the Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, the Russian Academy of Sciences (№ 122021000083-7).

**Conflict of interest:** the team of authors declares that there is no conflict of interest.

**For citation:** Lozhkin G. I., Grigoriev A. A., Vyukhin S. O., Chizhikova N. V. (2026). Analysis of regional growth curves of *Picea obovata* Ledeb. in the Southern Urals. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 69-87 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/5>.

*Received* 23.12.2025. *Revised* 29.01.2026. *Accepted* 15.03.2026. *Published online* 27.03.2026.

### Введение

Древесные кольца растений являются ценным архивом, в котором отражены изменения популяции и экосистемы в годичном разрешении. Характеристики колец деревьев зависят от различных факторов, которые обобщенно можно разделить на климат, возраст и возмущения<sup>8</sup>. Возмущения, в свою очередь, подразделяются на локальные (например, падение соседнего дерева) и на общие для некоторой популяции (например, нашествие насекомых); иногда общие возмущения имеют глобальный масштаб [1]. Для оценки влияния одних факторов из ряда измерений исследователи извлекают вклад других факторов. Так, удаление возмущений из исходных рядов производят через алгоритмическое разделение сигналов [2], а также с помощью отсеивания местообитаний и особей на этапе отбора проб<sup>9</sup>.

Для получения климатической составляющей из исходного ряда наблюдений изымают зависимость характеристики кольца от возраста. Причем этот шаг производят как на уровне отдельных деревьев<sup>10</sup>, так и на уровне пробной площади или района с использованием региональной кривой роста (РКР)[3]. Под РКР понимают эмпирически определенную кривую, предназначенную для описания зависимости характеристики древесного кольца от возраста. Особенности

РКР представляют интерес не только при выявлении возрастного тренда, но и для отслеживания изменений в популяции, а также для оценки влияния климата на прирост. В исследовании Наурзбаева и др.<sup>11</sup> дан анализ параметров РКР, полученных через аппроксимацию по кривой отрицательной экспоненты: обнаружен широтный, высотный и температурный градиенты для ширины годичного кольца (ШГК) лиственницы в Сибири. Также показана зависимость формы РКР *Pinus sylvestris* от плотности популяции<sup>12</sup> и от условий увлажнения субстрата [4]. Разделение на типы РКР было выполнено для отслеживания изменений в радиальном приросте для *Picea albertiana* и *Picea glauca* [5].

Монотонно убывающая функция отрицательной экспоненты не единственный вид зависимости, используемый для описания связи возраста и характеристик годичных колец. Широко используется кривая Хугерсхоффа [6], которая, по сути, является расширенной версией кривой отрицательной экспоненты с возможностью роста характеристики кольца в начале временной оси. Такая динамика характерна для особей в популяциях с высокой степенью сомкнутости крон, например, подобная форма кривой встречается у елей *Picea albertiana* и *Picea glauca* в Канаде [5].

---

<sup>8</sup>Cook E.R., Kairiukstis L.A. Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences. – Dordrecht: International Institute for Applied Systems Analysis, Kluwer Academic Publishers, 1990, 394 p. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0>

<sup>9</sup>Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В.С., Наурзбаев М. М., Хантемиров Р. М. Методы дендрохронологии. Часть I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. – Красноярск: КрасГУ, 2000, 80 с.

<sup>10</sup>Fritts H. Tree rings and climate. – Academic Press., 1976. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-268450-0.X5001-0>

<sup>11</sup>Naurzbaev M.A., Hughes M., Vaganov E.A. Tree-ring growth curves as sources of climatic information. Quaternary research. 2004; 62: 126-133. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.06.005>

<sup>12</sup>Helama S., Timonen M., Lindholm M., Meriläinen J., Eronen M. Extracting long-period climate fluctuations from tree-ring chronologies over timescales of centuries to millennia. International journal of climatology. 2005; 25: 1767-1779. – DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1215>

Ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) широко распространена на Урале: при продвижении на север этот вид чаще встречается на равнинах и речных поймах, в то же время, на юге произрастает в основном в высокогорьях<sup>13</sup>. Показано, что свойства субстрата в условиях дражных отвалов после золотодобычи (Средний Урал) влияют на высоту ели сибирской, а также на годичный линейный прирост ствола и ветвей [7]. На Южном Урале из-за глобального изменения климата [8] верхняя граница распространения ели сибирской смещается выше в горы [9, 10, 11], что с одной стороны, способствует увеличению депонирования углерода из атмосферы, а с другой - приводит к вымиранию эндемиков горной тундры [12; 13; 14; 15]. При этом связь радиального прироста (по данным после удаления возрастной изменчивости) ели сибирской со средней температурой лета слабая<sup>14</sup>. В этой связи зависимость морфометрических характеристик от возраста на верхней границе ареала ели сибирской на Южном Урале представляет особый интерес.

Цель данной работы - выявление различий в радиальном приросте ели сибирской на верхней границе распространения на Южном Урале с помощью анализа региональных кривых роста (РКР). Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: заложение пробных площадей, измерение радиального прироста, оценка возраста особей, аппроксимация РКР с помощью кривой Хугерсхоффа и сопоставление параметров РКР различных вершин и склонов по высотным уровням.

Определяющую роль при формировании леса на границе с тундрой играет температурный фактор: логично ожидать наибольших показателей прироста при уменьшении географической широты и снижении высоты над уровнем моря. При этом весь анализируемый материал был отобран по одному и тому же принципу на высотных уровнях, выделенных по сомкнутости крон деревьев вдоль экотона «таежный лес – горная тундра», следовательно, различия условий среды были частично учтены на стадии отбора проб. В связи с этим «нулевая гипотеза» данной работы заключается в том, что все деревья одного уровня на разных вершинах и склонах должны иметь близкие значения параметров РКР, так как они сходятся по популяционному показателю (сомкнутость крон), который, в свою очередь, зависит от условий среды и стадии зарастания.

### **Материалы и методы**

#### *Территория исследования*

На Южном Урале расположены самые южные горные тундры в Уральской горной стране. Южный Урал - единственная горная провинция Урала, где *Picea obovata* Ledeb. является повсеместно доминирующим древесный вид на границе леса, реже на отдельных участках встречается *Betula pubescens* ssp. *Tortuosa* Ledeb. Выше границы леса на открытых участках в тундре произрастает *Juniperus sibirica* Burgsd., местами формируя отдельный пояс растительности [12].

В настоящей работе выполнено исследование участков леса на границе с тундрой на трех хребтах в южной (Нары, г. Кашкатура), средней (Зигальга, перевал

<sup>13</sup>Мамаев С.А. Виды хвойных на Урале и их использование в озеленении. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. – 112 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26807083>

<sup>14</sup>Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. АН СССР, Урал. науч. центр, Ин-т экологии растений и животных. — М.: Наука, 1986. — 135 с.

между г. Поперечная и г. Лысая) и северной (Таганай, г. Дальний Таганай) частях Южного Урала (рис. 1).

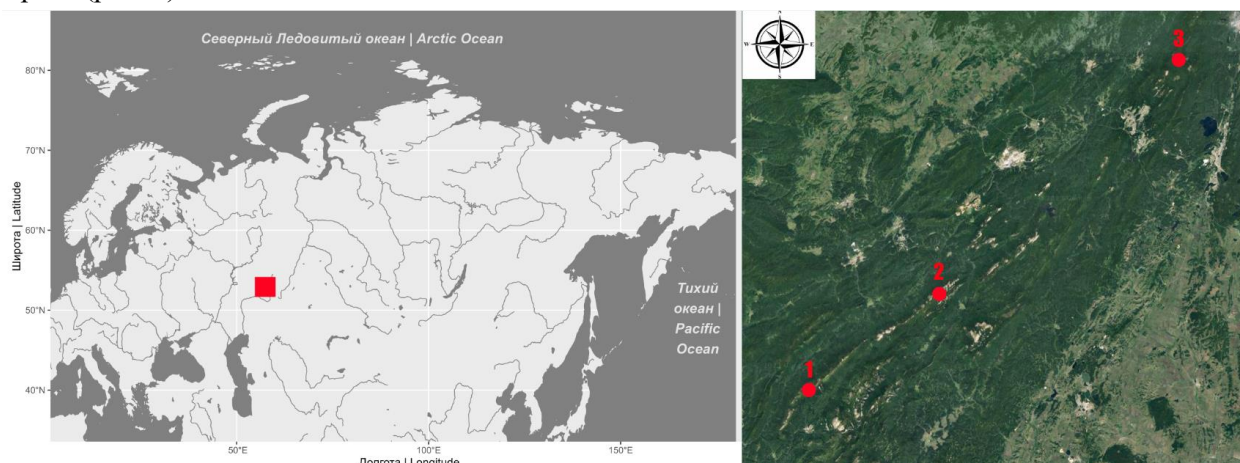


Рисунок 1. Расположение участков исследования: хребет Нары (1), хребет Зигальга (2), хребет Таганай (3)  
Источник: составлено авторами, космоснимок: Google ©CNES/Airbus, Maxar technologies.

Figure 1. Location of the study sites: Nary Ridge (1), Zigalga Ridge (2), Taganay Ridge (3)

Source: compiled by the authors, satellite image: Google ©CNES/Airbus, Maxar Technologies.

Из-за небольшого количества различных по климату и рельефу участков (3 хребта) в рамках настоящей работы не предполагается сравнение параметров РКР с показателями среды статистическими методами. Тем не менее, для интерпретации полученных результатов необходимо иметь представление о различиях местообитаний по характеристикам климата и рельефа. Так как неоднородность климатических условий между склонами одного хребта сложно выявить по метеостанциям (расположенным на некотором удалении от исследуемых участков), в анализе были использованы значения из открытых источников [16, 17, <sup>15</sup>, <sup>16</sup>], которые сгруппированы в регулярных сетках. Отметим, что значения в ячейках усреднены сразу за несколько десятилетий (таб. 1). Сформированные по такому принципу наборы широко используются при

моделировании видового разнообразия, также эти данные применимы для сопоставления с параметрами РКР, которые получены по измерениям ШГК за несколько десятков или сотен лет.

Затруднительно определить, на сколько сильно оценки температуры и осадков (таб. 1) отличаются от наблюдений метеостанций из-за разных принципов формирования рядов. Например, в коллекции [16] дневная или ночная температура определены по медианным значениям с использованием данных дистанционного зондирования Земли, в то время, как доступные нам ряды температуры метеостанции «Таганай-гора» представлены в среднесуточном или среднемесячном разрешении. О заниженной скорости ветра в таб. 1 можно заключить после сравнения с данными метеостанции «Таганай-гора», где средняя скорость оценена

<sup>15</sup>Abatzoglou J. T., Dobrowski S. Z., Parks S. A., Hegewisch K. C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. Scientific Data. 2018; 5: 170191. – DOI: 10.1038/sdata.2017.191

<sup>16</sup>Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe. Version 4 [Электронный ресурс]. CGIAR Consortium for Spatial Information, 2008. URL: <http://srtm.csi.cgiar.org> (дата обращения: 07.12.2025).

в пределах от 9.6 до 13 м/с [12]. Одной из причин занижения оценок скорости ветра на Таганае и других хребтах является усреднение скорости внутри ячейки раstra размером ~4 км, из-за чего помимо незаросших фрагментов тундры и каменистых россыпей в расчет попадают и лесные участки с высокой степенью сомкнутости. С использованием платформы Google Earth Engine [18] выделены средние или суммарные значения за несколько лет для линий верхних границ редин с буфером 100 м (таб. 1). Выбраны именно границы редин, так как они характерны для мест наиболее явного перехода из леса в тундру вдоль экотона.

Характерной особенностью рельефа Южного Урала является наличие древних поверхностей выравнивания, поднятых на разную высоту. Поэтому здесь преобладают плосковершинные или куполовидные хребты и массивы, независимо от их высоты. На склонах развиты гольцовые нагорные террасы, которые придают ступенчатость склонам. На каменистых россыпях и останцах гольцовых вершин формируются примитивные аккумулятивные почвы. Верхний горизонт горно-тундровых почв перегнойно-торфянистый, в нем значительно больше разложившихся растительных остатков, чем минеральных частиц. В местах

накопления мелкозема развиты горно-тундровые и дерновые горно-луговые почвы. Низкорослые и разреженные леса подгольцового пояса произрастают на дерновых горно-лесных почвах. Формирование названных категорий почв тесно связано с разрушением каменных россыпей и накоплением мелкозема<sup>17</sup>. Нам не известны проведенные ранее работы, направленные на выявление отличий почвенных характеристик тундровых участков в разных частях Южного Урала. Отметим, что на всех рассматриваемых хребтах обнаружены сходные по видовому составу горные тундры, основные различия исследуемых участков отражены в высоте над уровнем моря, экспозиции склона, широтном расположении хребта, истории зарастания и современной сомкнутости крон древостоев.

Исследованиями были охвачены древостои ели сибирской, произрастающие в экотоне верхней границы древесной растительности в горах Южного Урала от верхней границы сомкнутых лесов до отдельных деревьев в тундре. Средний возраст деревьев варьирует от 80 лет на нижней части экотона до 25 лет в верхней части экотона, диаметр на высоте 1.3 м от 16 до 5 см, высота ствола от 7.5 до 2.5 м, соответственно [13; 14].

---

<sup>17</sup>Погодина Г.С., Розов Н.Н. Почвы // Урал и Пиуралье. – М.: Наука, 1968. – С. 167-210.

Характеристика участков исследования. Показатели определены для территории вдоль границ редин. Температура получена через усреднение медианных оценок дневной температуры по месяцам. Обозначения склонов (в заголовках колонок): N – северо-восточный склон хребта Нары, Z1 – юго-восточный склон хребта Зигальга, Z2 – северо-западный склон хребта Зигальга, T1 – юго-западный склон хребта Таганай, T2 – северо-западный склон хребта Таганай

Table 1

Characteristics of study areas. The indicators are determined for the area along the boundaries of open forests. Temperature is derived by averaging the median daily temperature estimates by month. Slope designations: N – northeastern slope of the Nary Ridge, Z1 – southeastern slope of the Zigalga Ridge, Z2 – northwestern slope of the Zigalga Ridge, T1 – southwestern slope of the Taganay Ridge, T2 – northwestern slope of the Taganay Ridge

Высотный профиль   Altitudinal transect	N	Z1	Z2	T1	T2	Период усреднения   Averaging period	Источни к   Source
Средняя температура, °C   Average temperature, °C	1.83	1.40	1.77	2.10	2.19	с 2000 по 2021 год   from 2000 to 2021	[16]
Сумма осадков, мм   Total precipitation, mm	623	589	579	582	578	с 1950 по 2021 год   from 1950 to 2021	[17]
Средняя скорость ветра на высоте 10 м, м/с   Average wind speed at a height of 10 m, m/s	2.14	2.19	2.19	2.38	2.38	с 2000 по 2021 год   from 2000 to 2021	<sup>8</sup>
Средняя высота, м   Average height, m	1288	1260	1246	1088	1076	2003 с последующими обновлениями 2003 with subsequent updates	<sup>9</sup>

Источник: составлено авторами

Source: compiled by the authors

*Отбор и подготовка материала*

Данные в таб. 1 сгруппированы по заложенным в ходе полевых работ высотным профилям для склонов разной экспозиции. На каждом профиле пробные площади были заложены на 3 высотных уровнях: верхний уровень (уровень 1) – на верхней границе распространения отдельных деревьев в тундре; средний уровень (уровень 2) – на верхней границе распространения редин; нижний уровень (уровень 3) – на верхней границе распространения редколесий. Выбор направления закладки высотных профилей по экспозиции склона был осуществлен по принципу непрерывности: выбирались направления, по возможности, без резких

перепадов высот и прерываний градиента сомкнутости.

На трех высотных уровнях каждого из профилей были заложены от 3 до 7 пробных площадей в период с 2022 по 2025 годы. У всех деревьев на пробной площади были зафиксированы диаметр на основании, диаметр на высоте 1.3 м, диаметр кроны в двух взаимно перпендикулярных направлениях и жизненное состояние. Для получения рядов радиального прироста и оценки возраста было выполнено изъятие образцов древесины (кернов) в основании дерева при помощи бура Пресслера с последующей обработкой кернов в лабораторных условиях и измерением

ширины годовых колец на полуавтоматической установке Lintab 5 (подробное описание подготовки и измерения образцов дано в работе [14]). В случаях, когда керны не достигали центра ствола, для оценки года формирования центрального кольца производили расчёт недостающих колец при помощи прозрачной пленки с нанесёнными линиями окружностей разного размера. На отобранных образцах не были обнаружены следы пожаров, также при закладке пробных площадей не наблюдалось значительного количества усохших деревьев. Часть измеренных рядов ШГК ранее была задействована в работах, в которых не производился анализ РКР [12; 13; 14]. Суммарно для анализа РКР были использованы измерения ШГК для 989 деревьев.

### *Оценка параметров региональных кривых роста (РКР)*

В данной работе выполнен анализ параметров кривой Хугерсхоффа, описывающей возрастную тенденцию радиального роста ели сибирской на Южном Урале с помощью функции вида:

$$I_t = at^b e^{(-ct)} + I_{min} \quad (1)$$

где  $I_t$  – моделируемая ШГК (мм) для возраста дерева  $t$  (лет);  $I_{min}$  – асимптота минимального значения, то есть, ожидаемый прирост старовозрастных особей,  $c$  – параметр, характеризующий вогнутость кривой (чем выше  $c$ , тем сильнее выражена вогнутость кривой). При повышении параметра  $a$  увеличивается разница между ожидаемым максимумом и минимумом РКР. В случае, когда параметр  $b$  равен нулю, функция принимает вид кривой модифицированной отрицательной экспоненты<sup>8</sup>. Максимальное значение прироста  $I_{max}$  достигается при  $t=b/c$ .

Аппроксимация РКР функцией Хугерсхоффа осуществлена методом наименьших квадратов с использованием функции `nls()` из пакета `nlme` [19] в R [20]. Запуск функции `nls()` выполнялся со стандартными настройками при увеличении максимального количества шагов с 50 до 100. Оценка доверительных интервалов выполнена через процедуру `bootstrap` [21] без дополнительной коррекции, описываемую следующими шагами: аппроксимация кривой Хугерсхоффа на случайной выборке из всех рядов на высотном уровне одного склона с возможными повторами (шаг 1), сохранение параметров кривой и оценок ШГК для возраста от 0 до 170 лет в отдельные коллекции (шаг 2), повтор шагов 1 и 2 в течении 2000 раз с разными выборками из общего набора (шаг 3). По квантилям 0.025, 0.5 и 0.975 полученного `bootstrap`-распределения были найдены соответствующие им нижняя граница, медиана и верхняя граница доверительного интервала (95%) для параметров кривой или оценок ШГК по возрастам от 0 до 170 лет.

### **Результаты и их обсуждение**

При создании табл. 1 для условий среды в окрестностях верхних границ редины обнаружены следующие особенности:

1) Наибольшая средняя температура года характерна для хребта Таганай, наименьшая – для хребта Зигальга. При этом южные склоны теплее, в первую очередь, из-за более высокой инсоляции.

2) Наибольшая сумма осадков получена на хребте Нары, на других рассматриваемых хребтах – сумма осадков ниже, причем на склонах северо-западной экспозиции осадков больше, чем на склонах юго-восточной и юго-западной экспозиции. Западный макросклон Южного Урала получает большее количество влажных воздушных масс, при этом пробные

площади юго-западного склона на горе Дальний Таганай ограждены от них возвышенностью к западу от мест закладки пробных площадей [13].

3) Скорость ветра увеличивается при смещении на север, где сильнее доминируют арктические воздушные массы [9].

4) Средняя высота расположения верхней границы редины уменьшается при сравнении северных участков с более южными, так как линии изотерм смещаются на более низкие высоты. При этом высота верхней границы редины на северо-западных склонах выше, чем высота на юго-западных и юго-восточных склонах. Вероятно, это связано с более высокой скоростью расселения особей, которой при переносе семян способствует западный ветер [14].

Результаты аппроксимации РКР по кривой Хугерсхоффа выведены на рис. 2-4.

Перед анализом параметров РКР мы обозначим несколько заключений по диаграммам рассеяния, исходя из предположения, что по возрасту наиболее зрелых особей на высотных уровнях можно дать приблизительную оценку датам начала заселения территории.

По диаграммам рассеяния трех высотных уровней хребта Нары (рис. 2) можно выделить следующую особенность: на верхнем уровне, в отличие от нижнего и среднего уровней, обнаружены несколько особей старше 120 лет. Вероятно, расселение на хребте Нары проходило почти одновременно на всех высотных уровнях. Из чего следует, что различия РКР данного хребта в большей степени определены условиями среды и в меньшей степени – различиями возраста особей на высотных уровнях.

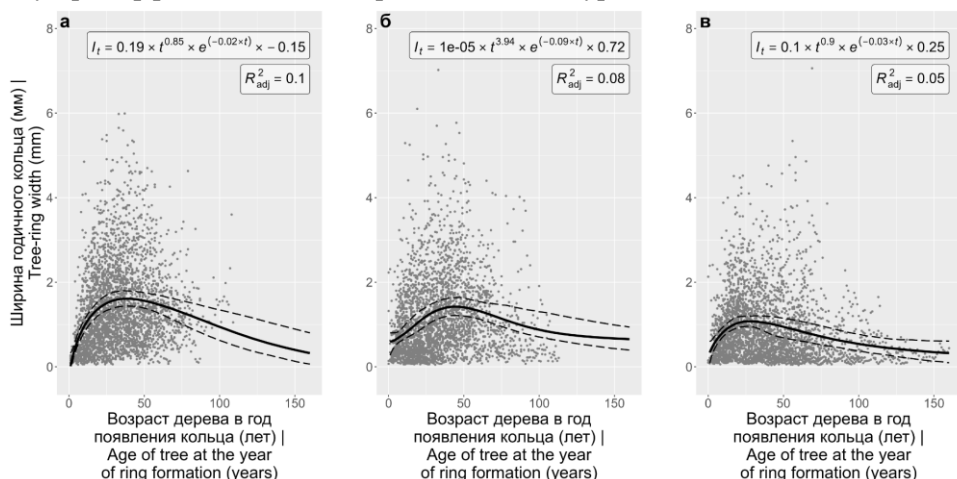


Рисунок 2. Результаты оценки параметров РКР хребта Нары на нижнем (а), среднем (б) и верхнем (в) высотном уровне склона северо-восточной экспозиции. Диаграмма рассеяния - измерения ШГК всех деревьев за каждый год. Для каждого уровня в верхней части графиков выведены результаты аппроксимации по уравнению 1 для полного набора точек с исправленным  $R^2$ . Медиана (черная линия) и границы доверительных интервалов (пунктир) для оценок ШГК получены с помощью процедуры «bootstrap»

Источник: составлено авторами

Figure 2. Results of estimating the parameters of the Nary Ridge's RGC at the lower (a), middle (b), and upper (c) elevation levels of the northeastern-facing slope. Scatterplot plots the TRW measurements for all trees for each year. For each level, the results of approximation according to equation 1 for the full set of points with corrected  $R^2$  are shown at the top of the graphs. The median (black line) and confidence interval boundaries (dashed line) for the TRW estimates were obtained using the bootstrap procedure

Source: compiled by the authors

На диаграммах рассеяния северо-западного склона хребта Зигальга (рис. 3г-е) заметнее различия по возрасту наиболее зрелых особей на разных высотных уровнях: возраст превышает 150 лет на нижнем уровне и не доходит до 100 лет на среднем и верхнем уровнях, в то время, как на юго-восточном склоне (рис. 3а-в) возраст наиболее зрелых

особей на всех высотах лежит в пределах от 90 до 115 лет, за исключением одного дерева на уровне 2 (рис. 3б, ось x ограничена до 155 лет), возраст которого достигает 190 лет. Полученный результат сходится с выводом о более высокой скорости расселения особей на северо-западном склоне хребта Зигальга [14], по крайней мере, для последних десятилетий.

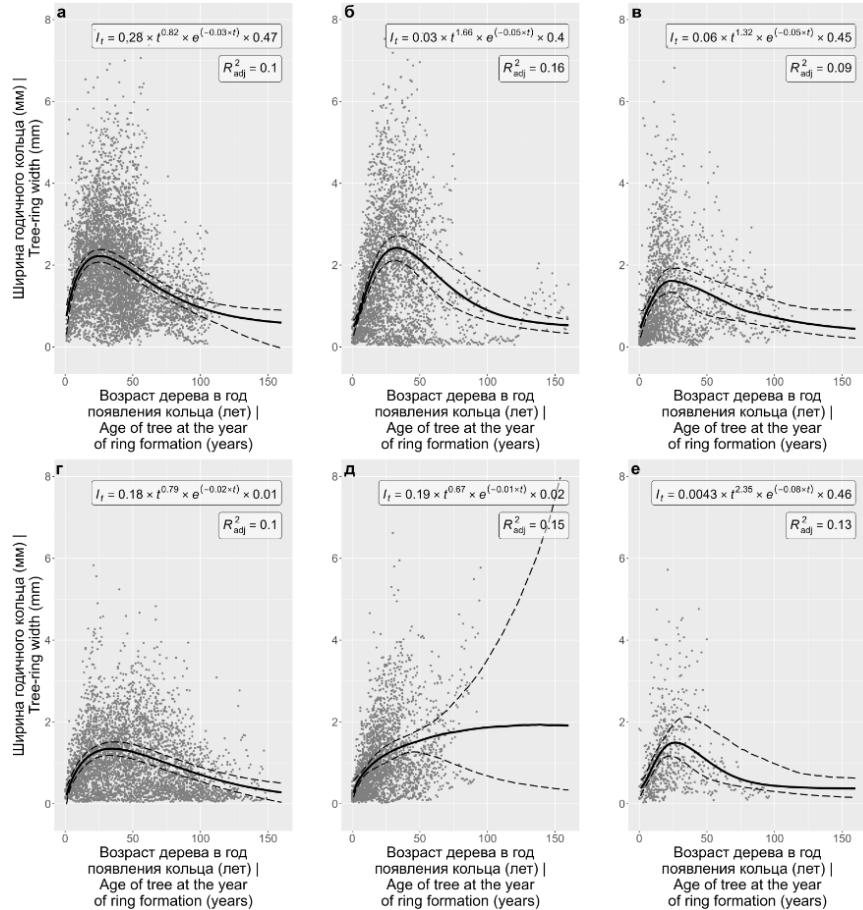


Рисунок 3. Результаты оценки параметров РКР хребта Зигальга на нижнем (а), среднем (б) и верхнем (в) высотном уровне склона юго-восточной экспозиции и на нижнем (г), среднем (д) и верхнем (е) высотном уровне склона северо-западной экспозиции. Условные обозначения совпадают с условными обозначениями к рис. 2.

Источник: составлено авторами.

Figure 3. Results of the assessment of the parameters of the Zigalga ridge RGC at the lower (a), middle (b) and upper (c) altitude levels of the south-eastern slope and at the lower (g), middle (e) and upper (e) altitude levels of the north-western slope. The legend coincides with the legend to Fig. 2.

Source: compiled by the authors

На среднем уровне северо-западного склона Зигальги (рис. 3д) не удалось с достаточной степенью уверенности (95%) определить возраст ожидаемого максимума

ШГК, так как не все варианты РКР в границах доверительных интервалов перешли в стадию снижения ШГК. По такому же принципу на хребте Таганай не удалось определить возраст

ожидаемого максимума ШГК верхних уровней (рис. 4 в, е). Перечисленные участки были исключены из дальнейшего анализа. На всех остальных уровнях хребта Таганай возраст зрелых особей достигает 90-110 лет, с большим количеством зрелых особей на нижних уровнях (рис. 4 а, б, г, д). Таким образом, начало расселения могло происходить приблизительно в одни и те же годы с обоих склонов и раньше началось на нижнем уровне.

Важно отметить, что оценки времени начала заселения высотных уровней по диаграммам рассеяния носят приблизительный характер, так как при анализе подобных диаграмм нельзя учесть смертность особей: неизвестно, являются ли наиболее старые обнаруженные живые деревья первыми, заселившими ту или иную пробную площадь.

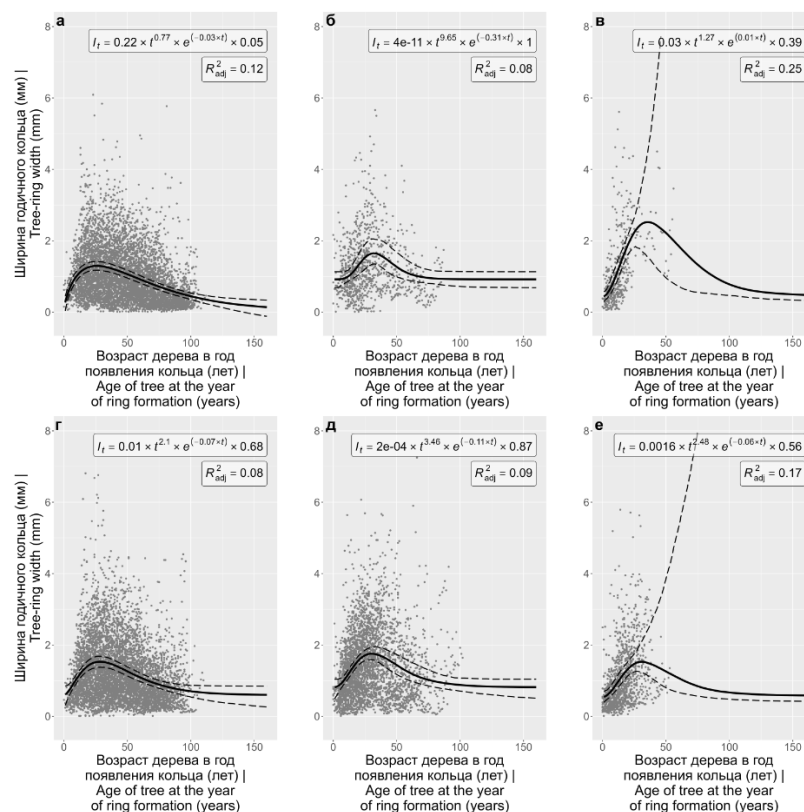


Рисунок 4. Результаты оценки параметров РКР хребта Таганай на нижнем (а), среднем (б) и верхнем (в) высотном уровне склона юго-западной экспозиции и на нижнем (г), среднем (д) и верхнем (е) высотном уровне склона северо-западной экспозиции. Условные обозначения совпадают с условными обозначениями к рис. 2

Источник: составлено авторами

Figure 4. Results of assessing the parameters of the Taganay Ridge's RGC at the lower (a), middle (b), and upper (c) elevation levels of the southwestern-facing slope and at the lower (d), middle (e), and upper (e) elevation levels of the northwestern-facing slope. The legend matches that in Fig. 2

Source: compiled by the authors

Для более наглядного сравнения параметров мы вывели полученные из их bootstrap-распределений доверительные

интервалы (95%) в виде отрезков с нанесенными медианами (рис. 5). Для определения статистической значимости

различий получены распределения с разницеми 2000 сгенерированных параметров: различия считаются значимыми если квантили 0.025 и 0.975 имеют один знак

(оба выше или ниже 0). Значения, использованные при построении рис. 5, выведены в табл. 2.

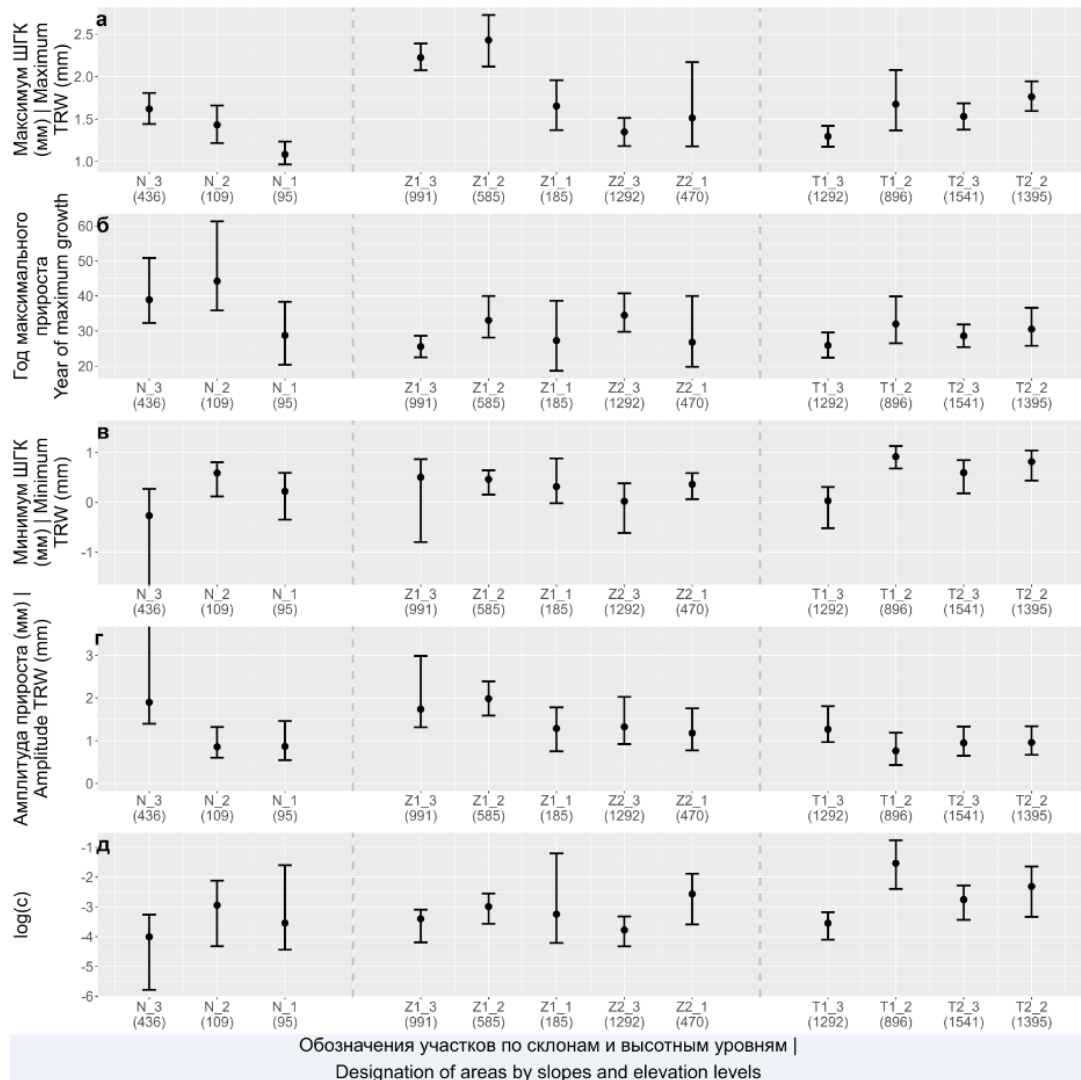


Рисунок 5. Границы доверительных интервалов параметров РКР

Figure 5. Boundaries of the confidence intervals of the RGC parameters.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors

Обозначения склонов: N – северо-восточный склон хребта Нары, Z1 – юго-восточный склон хребта Зигальга, Z2 – северо-западный склон хребта Зигальга, T1 – юго-западный склон хребта Таганай, T2 – северо-западный склон хребта Таганай. Высотный уровень обозначен по последней цифре (1, 2 или 3). В скобках указана густота древостоя (особей/гектар). Для улучшения визуального сопоставления между уровнями не показана часть границ для уровня «N\_3» (в) и (г).

Slope designations: N – northeastern slope of the Nary Ridge, Z1 – southeastern slope of the Zigalga Ridge, Z2 – northwestern slope of the Zigalga Ridge, T1 – southwestern slope of the Taganay Ridge, T2 – northwestern slope of the Taganay Ridge. The altitudinal level is designated by the last digit (1, 2 or 3). The tree stand density (individuals/hectare) is given in parentheses. To improve visual comparison between the levels, some of the boundaries for level "N\_3" (c) and (d) are not shown.

Параметр   Parameter	N_3	N_2	N_1	Z1_3	Z1_2	Z1_1	Z2_3	Z2_1	T1_3	T1_2	T2_3	T2_2
$I_{max}$ (0.025)	1.4	1.2	1.0	2.1	2.1	1.4	1.2	1.2	1.2	1.4	1.4	1.6
$I_{max}$ (0.5)	1.6	1.4	1.1	2.2	2.4	1.7	1.4	1.5	1.3	1.7	1.5	1.8
$I_{max}$ (0.975)	1.8	1.7	1.2	2.4	2.7	2.0	1.5	2.2	1.4	2.1	1.7	2.0
$t_{max}$ (0.025)	32.3	35.9	20.4	22.5	28.1	18.7	29.8	19.8	22.4	26.5	25.4	25.8
$t_{max}$ (0.5)	38.9	44.2	28.8	25.6	33.1	27.3	34.5	26.8	25.9	32.0	28.6	30.5
$t_{max}$ (0.975)	50.8	61.3	38.3	28.7	40.0	38.6	40.7	40.0	29.6	39.9	31.9	36.6
$I_{min}$ (0.025)	-4.1	0.1	-0.4	-0.8	0.2	0.0	-0.6	0.1	-0.5	0.7	0.2	0.4
$I_{min}$ (0.5)	-0.3	0.6	0.2	0.5	0.5	0.3	0.0	0.4	0.0	0.9	0.6	0.8
$I_{min}$ (0.975)	0.3	0.8	0.6	0.9	0.6	0.9	0.4	0.6	0.3	1.1	0.9	1.0
$I_{delta}$ (0.025)	1.4	0.6	0.5	1.3	1.6	0.8	0.9	0.8	1.0	0.4	0.7	0.7
$I_{delta}$ (0.5)	1.9	0.9	0.9	1.7	2.0	1.3	1.3	1.2	1.3	0.8	1.0	1.0
$I_{delta}$ (0.975)	5.5	1.3	1.5	3.0	2.4	1.8	2.0	1.8	1.8	1.2	1.3	1.3
$\log(c)$ (0.025)	-5.8	-4.3	-4.4	-4.2	-3.6	-4.2	-4.3	-3.6	-4.1	-2.4	-3.4	-3.3
$\log(c)$ (0.5)	-4.0	-2.9	-3.5	-3.4	-3.0	-3.3	-3.8	-2.6	-3.6	-1.5	-2.8	-2.3
$\log(c)$ (0.975)	-3.3	-2.1	-1.6	-3.1	-2.6	-1.2	-3.3	-1.9	-3.2	-0.8	-2.3	-1.7

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors

Обозначения склонов (в заголовках колонок): N – северо-восточный склон хребта Нары, Z1 – юго-восточный склон хребта Зигальга, Z2 – северо-западный склон хребта Зигальга, T1 – юго-западный склон хребта Таганай, T2 – северо-западный склон хребта Таганай. Высотный уровень обозначен по последней цифре (1, 2 или 3). Параметры:  $I_{max}$  – максимальная ШГК (мм),  $t_{max}$  – год достижения максимальной ШГК (лет),  $I_{min}$  – минимальная ШГК (мм),  $I_{delta}$  – амплитуда ШГК (мм),  $c$  – безразмерная величина, характеризующая вогнутость РКР. Значение в скобках – квантиль bootstrap-распределения для соответствующего параметра РКР.

Slope designations: N – northeastern slope of the Nary Ridge, Z1 – southeastern slope of the Zigalga Ridge, Z2 – northwestern slope of the Zigalga Ridge, T1 – southwestern slope of the Taganay Ridge, T2 – northwestern slope of the Taganay Ridge. The altitudinal level is designated by the last digit (1, 2 or 3). Parameters:  $I_{max}$  – maximum TRW (mm),  $t_{max}$  – year of reaching the maximum TRW (years),  $I_{min}$  – minimum TRW (mm),  $I_{delta}$  – TRW amplitude (mm),  $c$  – dimensionless value characterizing the

concavity of the RGC. The value in brackets is the bootstrap distribution quantile for the corresponding parameter of the RGC.

Среднее значение остатков, определенных как разница между измеренной ШГК и оценкой по кривой Хугерсхоффа, для рассматриваемых площадок варьирует от  $-2.65 \cdot 10^{-6}$  до  $4.9 \cdot 10^{-7}$ , а стандартное отклонение меняется от 0.65 до 0.94, что можно считать приемлемым результатом аппроксимации. Однако медиана остатков находится в диапазоне от -0.26 до -0.07, кроме этого, skewness-статистика принимает положительные значения (от 0.86 до 1.79). Распределение остатков по всем пробным площадям не является нормальным ( $p$ -value < 0.01 для теста Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса), а медиана значимо отличается от 0 ( $p$ -value < 0.01 для теста

Вилкоксона). Таким образом, для всех пробных площадей распределение остатков вытянуто в правую сторону, что свидетельствует о недооценке значений с помощью кривой Хугерсхоффа. При визуальном анализе графиков (рис. 2-4) недооценка ШГК особенно заметна для тех лет, где ожидается максимум прироста. Выявленная особенность объясняется тем, что исследуемая характеристика (ШГК) не ограничена сверху, но ограничена снизу, так как ШГК не может принимать отрицательные значения. Классическим решением обозначенной проблемы является логарифмическая трансформация исследуемой характеристики кольца. В настоящей работе логарифмическая трансформация не проводилась, так как диаграммы рассеяния, полученные в ее результате, меньше подходят для анализа с использованием кривой Хугерсхоффа, например, менее выражено экспоненциальное снижение ШГК после достижения максимума прироста.

Наибольшая ожидаемая максимальная ШГК ( $I_{max}$ ) получена на нижнем и среднем уровне юго-восточного склона хребта Зигальга (рис. 5а, табл. 2). Значения максимальной ШГК, достигаемые на этих уровнях, значительно отличаются от оценок максимальной ШГК для всех остальных хребтов и участков, вероятно, этому способствует высокая инсоляция южного склона. Однако на юго-западном профиле Таганая получены низкие значения  $I_{max}$ , по всей видимости, на этом хребте ключевую роль в ограничении радиального роста играет ветер (таб. 1). Верхние границы доверительных интервалов  $I_{max}$  (рис. 5а, таб. 2) нижнего и среднего уровня юго-восточного

склона хребта Зигальга близки к оценкам максимального прироста ели сибирской (~2.5, определено по графику 3d из работы<sup>18</sup>) на границе с тундрой и в зоне северной тайги с 1951 по 2000 год в республике Коми.

Постепенное уменьшение  $I_{max}$  вдоль профиля получено только на хребте Нары (различия значимы между нижним и верхним уровнями), где, как было сказано выше, заселение всех высотных уровней началось приблизительно в одно время и различия параметров РКР в большей степени объясняются условиями среды. Кроме этого, хребет Нары выделяется по году ожидаемого максимального прироста (рис. 5б): на среднем уровне он наступает значительно позже по сравнению со средними уровнями других хребтов; аналогично на нижнем уровне, но различия не значимы при сравнении с северо-западным склоном хребта Зигальга. Отметим, что в работе<sup>11</sup> максимальный прирост ели в северной тайге и на границе с тундрой тоже наблюдался после 40 лет, при этом в условиях южной и центральной тайги первый пик прироста был выявлен до 20 лет. Таким образом, поздний выход на максимальные значения РКР среднего и нижнего уровня хребта Нары может быть индикатором неблагоприятных условий произрастания.

Три других рассматриваемых параметра (рис. 5в-д), а именно, ожидаемый минимум ШГК ( $I_{min}$ ), ожидаемая амплитуда ШГК ( $I_{max}-I_{min}$ ) и параметр вогнутости кривой ( $c$ ), напрямую или косвенно связаны с нижней асимптотой РКР. Так как в настоящее время еще происходит заселение ели в горную тундру, доверительный интервал  $I_{min}$  половины уровней не полностью лежит выше 0. В связи с этим затруднительно делать выводы о различиях местообитаний по

<sup>18</sup>Lopatin E., Kolström T. Spiecker H. Long-term trends in radial growth of Siberian spruce and  
82

Scots pine in Komi Republic (northwestern Russia). Boreal Env. Res. 2008; 13: 539–552.

параметрам  $I_{min}$ ,  $I_{max}-I_{min}$  и  $c$ . Так, границы доверительных интервалов параметра вогнутости  $c$  (рис. 5д) повышаются при увеличении высотного уровня, но в большинстве случаев различия не являются значимыми.

Ранее проводились исследования<sup>5</sup>, направленные на выявление связи параметров РКР и густоты древостоя. В настоящей работе были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена между медианными оценками параметров РКР и густотой древостоя (особей/гектар, рис. 5): ни для одного из параметров не получен значимый коэффициент корреляции. Отметим, что в работе Наурзбаева и др.<sup>4</sup> параметр  $c$  не анализировался и был принят характерным для каждого участка. В нашем случае связь между параметром  $c$  и густотой древостоя могла быть не выявлена из-за искажения оценок  $c$ , так как не на каждом уровне РКР вышла на нижнюю асимптоту (рис. 5д, табл. 2).

Также отметим, что аппроксимация кривой Хугерсхоффа может быть применена не только к облаку точек из всех измерений некоторого высотного уровня, но и к отдельным деревьям с последующим усреднением параметров. Полученные параметры кривых могут быть использованы для классификации особей в качестве альтернативы более субъективному подходу [5].

### **Выводы**

1. Ожидаемая ширина годичных колец ели сибирской на Южном Урале описана с

помощью кривой Хугерсхоффа, где радиальный прирост зависит от возраста. Форма этой кривой позволяет учесть прямую зависимость от возраста в первых десятилетиях жизни особи, которая затем сменяется на обратную зависимость.

2. Так как в настоящее время происходит заселение ели сибирской на территории горной тундры, не везде полученные региональные кривые достигли минимальных значений. В ряде случаев нельзя оценить даже максимум региональной кривой.

3. Обнаружены близкие значения большинства параметров региональных кривых роста на анализируемых хребтах. Наибольший ожидаемый максимальный прирост на всех уровнях варьируется от 1.0 до 2.2 мм, в большинстве случаев прирост достигает максимальных значений в возрасте от 18 до 38 лет. Среди исключений можно назвать ожидаемый максимальный прирост (от 2.1 до 2.7 мм) на нижних высотных уровнях юго-восточного склона в перевале между горой Поперечная и горой Круглая (хребет Зигальга), что может быть объяснено благоприятными условиями инсоляции и не высокой скоростью ветра, по сравнению с хребтом Таганай. Помимо этого, поздний выход региональных кривых роста на максимальные значения (от 32 до 61 лет) на среднем и нижнем уровнях хребта Нары может быть индикатором неблагоприятных условий произрастания.

### **Список литературы**

1. Хантемиров Р.М. События Мияке: обзор современного состояния исследований. Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 2. – С. 174-211. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/23>.

2. Guiterman C.H., Lynch A.M., Axelson, J.N. dfoIiatR: An R package for detection and analysis of insect defoliation signals in tree rings. *Dendrochronologia*. 2020; 63: 125750. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125750>.
3. Homfeld I.K., Büntgen U., Reinig F., Torbenson M.C.A., Esper J. Application of RCS and signal-free RCS to tree-ring width and maximum latewood density data. *Dendrochronologia*. 2024; 85: 126205. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126205>.
4. Ложкин Г.И., Чижикова Н.А., Тишин Д.В., Насырова Э.И. Региональные кривые роста сосны обыкновенной в местообитаниях разной увлажненности. *Российский журнал прикладной экологии*. – 2023. – Т.3 – С. 22-27. – DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.22.27>.
5. Strong W. L. *Picea* (spruce) growth rate (mm year<sup>-1</sup>) changes in southwest Yukon (Canada) since the mid 19th century. *Vegetation History and Archaeobotany*. 2020; 29(1): 91-100. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00334-019-00737-2>.
6. Helama S., Herva H., Arppe L., Gunnarson B., Frank T., Holopainen J., Nöjd P., Mäkinen H., Mielikäinen K., Sutinen R., Timonen M., Uusitalo J., Oinonen M. Disentangling the Evidence of Milankovitch Forcing From Tree-Ring and Sedimentary Records. *Front. Earth Sci.* 2022; 10: 871641. – DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.871641>.
7. Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А. Анатомоморфологические и биохимические показатели *Picea obovata* Ledeb. в посадках на дражном отвале после золотодобычи (Средний Урал). *Лесотехнический журнал*. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 294-309. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/17>.
8. Masson-Delmotte V., et al. (eds.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. United Kingdom, NY, 2021: 3–32. – DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
9. Шиятов С.Г., Моисеев П.А., Григорьев А.А. Фотомониторинг древесной и кустарниковой растительности в высокогорьях Южного Урала за последние 100 лет. – Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2020. – 191 с.
10. Zhang P., Liang Y., Liu B. Ma T., Wu M.M. A coupled modelling framework for predicting tree species' altitudinal migration velocity in montane forest. *Ecol. Model.* 2023; 484: 110481. – <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110481>.
11. Körner C. The cold range limit of trees. *Trends Ecol. Evol.* 2021; 36: 979-989. – <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.011>.
12. Григорьев А.А., Шалаумова Ю.В., Терентьева М.В., Вьюхин С.О., Балакин Д.С., Моисеев П.А. Горные тундры Южного Урала: современное распространение и угроза исчезновения в XXI веке. *Географическая среда и живые системы*. – 2024. – № 3. – С. 26-46. – DOI: <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2024-3-26-46>.
13. Grigoriev A.A., Mikhailov Y.E., Shalaumova Y.V., V'yukhin S.O., Balakin D.S., Ermakov A.I., Terent'eva, M.V., Erokhina O.V., Moiseev P.A., Kudryavtsev P.P. Upward Expansion of Trees and Shrubs Leads to Alpine Tundra Contraction and Local Extinction of Species in the Southern Urals. *Ecosystems*. 2025; 28(3). – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-025-00973-w>.
14. Григорьев А.А., Ложкин Г.И., Вьюхин С.О., Чижикова Н.А., Кудрявцев П.П. Моделирование и прогнозирование динамики верхней границы леса на хребте Зигальга (Южный Урал). *Географическая среда и живые системы*. – 2025. – № 3. – С. 32-51. – DOI: <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2025-3-32-51>.

15. Григорьев А.А., Клям Р.С., Вьюхин С.О., Громов А.М., Балакин Д.С., Воробьев И.Б., Шалаумова Ю.В. Пространственно-временная динамика древесной и кустарниковой растительности в горную тундру Дальнего Таганая (Южный Урал). Леса России и хозяйство в них. – 2023. – № 3 (86). – С. 28-38. – DOI: <https://doi.org/10.51318/FRET.2023.3.86.004>.
16. Hengl T., Parente L. Long-term MODIS LST day-time and night-time temperatures, sd and differences at 1 km based on the 2000-2020 time series (Version 1.1) [Электронный ресурс]. Zenodo, 2022. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6458406> (дата обращения: 07.12.2025).
17. Hengl T., Parente L. Monthly precipitation in mm at 1 km resolution (multisource average) based on SM2RAIN-ASCAT 2007–2021, CHELSA Climate and WorldClim (Version 0.3) [Электронный ресурс]. Zenodo, 2022. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6458580> (дата обращения: 07.12.2025).
18. Velastegui-Montoya A., Montalván-Burbano N., Carrión-Mero P., Rivera-Torres H., Sadeck L., Adami M. Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sens.* 2023; 15: 3675. – <https://doi.org/10.3390/rs15143675>.
19. Pinheiro J, Bates D, R Core Team. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. *R package* version 3.1-164. 2023. – URL: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
20. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2024. – URL: <https://www.R-project.org>.
21. Kostanek J., Karoleczak K., Kuliczowski W., Watala C. Bootstrap Method as a Tool for Analyzing Data with Atypical Distributions Deviating from Parametric Assumptions: Critique and Effectiveness Evaluation. *Data* 2024; 9 (95). – <https://doi.org/10.3390/data9080095>.

**References**

1. Hantemirov R. M. *Sobytiya Miyake: obzor sovremennogo sostoyaniya issledovaniy. Lesotekhnicheskii zhurnal* [Miyake events: a review of the state-of-the-art] *Forestry Engineering journal*, 2023, Vol. 13, №. 4 (52), part 2: 174-211. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/23>.
2. Guiterman C.H., Lynch A.M., Axelson, J.N. dfoIiatR: An R package for detection and analysis of insect defoliation signals in tree rings. *Dendrochronologia.* 2020; 63: 125750. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125750>.
3. Homfeld I.K., Büntgen U., Reinig F., Torbenson M.C.A., Esper J. Application of RCS and signal-free RCS to tree-ring width and maximum latewood density data. *Dendrochronologia.* 2024; 85: 126205. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126205>.
4. Lozhkin G.I., Chizhikova N.A., Tishin D.V., Nasyrova E.I. *Regional'nye krivye rosta sosny obyknovennoj v mestoobitaniyakh raznoj uvlazhnennosti. Rossijskij zhurnal prikladnoj ehkologii* [Regional growth curves of Scots pine in habitats with different moisture content]. *Russian Journal of Applied Ecology*, 2023; 3: 22–27. – DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.22.27>.
5. Strong W. L. *Picea* (spruce) growth rate (mm year<sup>-1</sup>) changes in southwest Yukon (Canada) since the mid 19th century. *Vegetation History and Archaeobotany.* 2020; 29(1): 91-100. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00334-019-00737-2>.
6. Helama S., Herva H., Arppe L., Gunnarson B., Frank T., Holopainen J., Nöjd P., Mäkinen H., Mielikäinen K., Sutinen R., Timonen M., Uusitalo J., Oinonen M. Disentangling the Evidence of

- Milankovitch Forcing From Tree-Ring and Sedimentary Records. *Front. Earth Sci.* 2022; 10: 871641. – DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.871641>.
7. Chukina N.V., Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A. *Anatomomorfologicheskie i biokhimicheskie pokazateli Picea obovata Ledeb. v posadkakh na drazhnom otvale posle zolotodobychi (Srednij Ural). Lesotekhnicheskii zhurnal.* [Anatomical, Morphological and Biochemical Characteristics of *Picea obovata* Ledeb. in Plantings on a Dredge Dump After Gold Mining (Middle Urals)]. *Forestry Engineering journal*, 2025. Vol. 15, №. 4 (60): 294-309. – <https://doi.org/DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2025.4/17>.
  8. Masson-Delmotte V., et al. (eds.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* United Kingdom, NY, 2021: 3–32. – DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
  9. Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Grigor'ev A.A. *Fotomonitoring drevesnoj i kustarnikovoj rastitel'nosti v vysokogor'yakh Yuzhnogo Urala za poslednie 100 let* [Photomonitoring of trees and shrubs in the highlands of the Southern Urals over the past 100 years]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo UMC UPI, 2020. 191 p.
  10. Zhang P., Liang Y., Liu B. Ma T., Wu M.M. A coupled modelling framework for predicting tree species' altitudinal migration velocity in montane forest. *Ecol. Model.* 2023; 484: 110481. – <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110481>.
  11. Körner C. The cold range limit of trees. *Trends Ecol. Evol.* 2021; 36: 979-989. – <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.011>.
  12. Grigoriev A.A., Shalaumova Yu.V., Terentyeva M.V., Vyukhin S.O., Balakin D.S., Moiseev P.A. *Gornye tundry Yuzhnogo Urala: sovremennoe rasprostranenie i ugroza ischeznoveniya v xxi veke. Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy.* [Alpine tundras of the Southern Urals: current distribution and threat of extinction in the 21 st century]. *Geographical Environment and Living Systems*, 2024; 3: 26–46. – DOI: <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2024-3-26-46>.
  13. Grigoriev A.A., Mikhailov Y.E., Shalaumova Y.V., V'yukhin S.O., Balakin D.S., Ermakov A.I., Terent'eva, M.V., Erokhina O.V., Moiseev P.A., Kudryavtsev P.P. Upward Expansion of Trees and Shrubs Leads to Alpine Tundra Contraction and Local Extinction of Species in the Southern Urals. *Ecosystems.* 2025; 28(3). – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-025-00973-w>.
  14. Grigoriev A.A., Lozhkin G.I., Vyukhin S.O., Chizhikova N.A., Kudryavtsev P.P. *Modelirovanie i prognozirovanie dinamiki verkhnej granicy lesa na khrebtie Zikal'ga (Yuzhnyj Ural). Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy.* [Modeling and forecasting the dynamics of the upper forest limit on the Zikalga ridge (Southern Urals)]. *Geographical Environment and Living Systems*, 2025; 3: 32–51. – DOI: <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2025-3-32-51>.
  15. Grigoriev A.A., Klyam R.S., Vyukhin S.O., Gromov A.M., Balakin D.S., Vorobyov I.B., Shalaumova Y. V. *Prostranstvenno-vremennaya dinamika drevesnoj i kustarnikovoy rastitelnosti v gornuyu tundru Dalnego Taganaya (Yuzhnyj Ural). Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh.* [Spatial-temporal dynamics of tree and shrub vegetation in the mountain tundra of Dalniy Taganay (Southern Urals)]. *Forests of Russia and economy in them*, 2023; 3 (86): 28-38. – DOI: <https://doi.org/10.51318/FRET.2023.3.86.004>.
  16. Hengl T., Parente L. Long-term MODIS LST day-time and night-time temperatures, sd and differences at 1 km based on the 2000-2020 time series (Version 1.1) [Online resource]. Zenodo, 2022. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6458406> (date of access: 07.12.2025).

17. Hengl T., Parente L. Monthly precipitation in mm at 1 km resolution (multisource average) based on SM2RAIN-ASCAT 2007–2021, CHELSA Climate and WorldClim (Version 0.3) [Online resource]. Zenodo, 2022. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6458580> (date of access: 07.12.2025).
18. Velastegui-Montoya A., Montalván-Burbano N., Carrión-Mero P., Rivera-Torres H., Sadeck L., Adami M. Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sens.* 2023; 15: 3675. – <https://doi.org/10.3390/rs15143675>.
19. Pinheiro J, Bates D, R Core Team. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. *R package* version 3.1-164. 2023. – URL: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
20. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2024. – URL: <https://www.R-project.org>.
21. Kostanek J., Karolczak K., Kuliczowski W., Watala C. Bootstrap Method as a Tool for Analyzing Data with Atypical Distributions Deviating from Parametric Assumptions: Critique and Effectiveness Evaluation. *Data* 2024; 9 (95). – <https://doi.org/10.3390/data9080095>.

### **Информация об авторах**

✉ *Ложкин Григорий Иванович* (г. Казань) – ассистент кафедры моделирования экосистем Института экологии, биотехнологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета; инженер-исследователь лаборатории дендрохронологии Института географии Российской академии наук; e-mail: [lozhkin.grig@gmail.com](mailto:lozhkin.grig@gmail.com); ORCID: 0009-0004-0962-3658.

*Григорьев Андрей Андреевич* (г. Екатеринбург) – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук; e-mail: [grigoriev.a.a@ipae.uran.ru](mailto:grigoriev.a.a@ipae.uran.ru); ORCID: 0000-0002-7446-0654.

*Вьюхин Сергей Олегович* (г. Екатеринбург) – кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук; e-mail: [sergey.vyuhin@mail.ru](mailto:sergey.vyuhin@mail.ru); ORCID: 0000-0001-7173-4878.

*Чижикова Нелли Александровна* (г. Казань) – кандидат биологических наук, доцент кафедры моделирования экосистем Института экологии, биотехнологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета; e-mail: [nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru](mailto:nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru); ORCID: 0000-0002-9969-9207.

### **Information about the authors**

✉ *Grigory I. Lozhkin* (Kazan) – Assistant, Department of Ecosystem Modeling, Institute of Ecology, Biotechnology, and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University; Research Engineer, Laboratory of Dendrochronology, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences; e-mail: [lozhkin.grig@gmail.com](mailto:lozhkin.grig@gmail.com); ORCID: 0009-0004-0962-3658.

*Andrey A. Grigoriev* (Ekaterinburg) – PhD (Agriculture), Senior Researcher, Laboratory of Geoinformation Technologies, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: [grigoriev.a.a@ipae.uran.ru](mailto:grigoriev.a.a@ipae.uran.ru); ORCID: 0000-0002-7446-0654.

*Sergey O. Vyukhin* (Ekaterinburg) – PhD (Agriculture), Junior Researcher, Laboratory of Geoinformation Technologies, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: [sergey.vyuhin@mail.ru](mailto:sergey.vyuhin@mail.ru); ORCID: 0000-0001-7173-4878.

*Nelli A. Chizhikova* (Kazan) – PhD (Biology), Assoc. Prof., Department of Ecosystem Modeling, Institute of Ecology, Biotechnology, and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: [nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru](mailto:nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru); ORCID: 0000-0002-9969-9207.