

Научная статья

УДК 551.58+57.044

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-105-119

## Воздействие климатических факторов на приросты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на побережье Кандалакшского залива Белого моря

А.Е. Кухта<sup>1</sup>✉, канд. биол. наук; ResearcherID: [A-9570-2016](https://orcid.org/0000-0002-3710-3578),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3710-3578>

О.В. Максимова<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAB-8632-2020](https://orcid.org/0000-0002-0569-8650),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0569-8650>

В.В. Кузнецова<sup>3</sup>, канд. геогр. наук; ResearcherID: [AAG-7392-2021](https://orcid.org/0000-0003-3155-7330),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3155-7330>

<sup>1</sup>Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, ул. Глебовская, д. 20 б, Москва, Россия, 107258; [anna\\_koukhata@mail.ru](mailto:anna_koukhata@mail.ru)✉

<sup>2</sup>Университет МИСИС, просп. Ленинский, д. 4, Москва, Россия, 119049; [o-maximova@yandex.ru](mailto:o-maximova@yandex.ru)

<sup>3</sup>Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, Москва, Россия, 119017; [kuznetsova@igras.ru](mailto:kuznetsova@igras.ru)

Поступила в редакцию 11.04.21 / Одобрена после рецензирования 22.07.21 / Принята к печати 01.08.21

**Аннотация.** Цель данной работы – сравнительный анализ изменчивости линейных и радиальных приростов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) побережья Кандалакшского залива Белого моря в зависимости от условий произрастания, а также оценка отклика этого вида на воздействия температур и осадков текущего и предыдущего вегетационных сезонов. Используются стандартные способы измерений и анализа данных. В качестве показателя отклика древостоев на воздействия факторов среды обитания служила динамика приростов в высоту и по диаметру. Проведена статистическая оценка вариабельности приростов в зависимости от типа местообитания, а также оценка связи биометрических показателей древостоев с суммами осадков и средними температурами. Для рядов индексов линейных приростов выявлены значимые отличия между различными биотопами; для радиальных – не выявлены. Таким образом, по рядам радиальных приростов возможно проводить наблюдения за типичным поведением изменчивости деревьев вне зависимости от типа биотопа. Это дает основание к осуществлению долгосрочного ретроспективного анализа взаимоотношений древостоев и среды с использованием древесно-кольцевых хронологий без учета условий произрастания. Подтверждена роль осадков как лимитирующего фактора для радиальных и линейных приростов в ходе фенофазы роста междуузлий и развития ранней древесины. Лимитирующая роль температур обнаружена для радиальных приростов лишь на этапах формирования поздней древесины и накопления ресурсов для роста в следующем вегетационном сезоне. Выявлена высокая чувствительность к воздействиям климатических факторов линейных приростов, что обуславливает их большую информативность в качестве критерия оценки состояния лесных экосистем для коротких (до 30 лет) периодов. Однако это, в свою очередь, диктует невозможность формирования многолетних рядов, как для радиальных приростов, что является существенным ограничением при

использовании данного метода. Сделано заключение о том, что выбор методов анализа по линейным или по радиальным приростам определяется целями планируемого исследования – мониторинга лесных экосистем в современных условиях изменения климата или долгосрочного палеоклиматического анализа.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, линейный прирост, радиальный прирост, биотоп, сумма осадков, температура, Кандалакшский залив, Республика Карелия

**Для цитирования:** Кухта А.Е., Максимова О.В., Кузнецова В.В. Воздействие климатических факторов на приросты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на побережье Кандалакшского залива Белого моря // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 105–119. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-105-119>

Original article

### Influence of Climatic Factors on Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Growth on the Coast of the Kandalaksha Bay of the White Sea

**Anna E. Koukhta**<sup>1</sup>✉, Candidate of Biology; ResearcherID: [A-9570-2016](https://orcid.org/0000-0002-3710-3578),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3710-3578>

**Olga V. Maksimova**<sup>1,2</sup>, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAB-8632-2020](https://orcid.org/0000-0002-0569-8650),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0569-8650>

**Veronika V. Kuznetsova**<sup>3</sup>, Candidate of Geography; ResearcherID: [AAG-7392-2021](https://orcid.org/0000-0003-3155-7330),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3155-7330>

<sup>1</sup>Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, ul. Glebovskaya, 20b, Moscow, 107058, Russian Federation; [anna\\_koukhta@mail.ru](mailto:anna_koukhta@mail.ru)✉

<sup>2</sup>University of Science and Technology MISIS, prosp. Leninskiy, 4, Moscow, 119049, Russian Federation; [o-maximova@yandex.ru](mailto:o-maximova@yandex.ru)

<sup>3</sup>Institute of Geography Russian Academy of Sciences, per. Staromonetny, 29, Moscow, 119017, Russian Federation; [kuznetsova@igras.ru](mailto:kuznetsova@igras.ru)

Received on April 11, 2021 / Approved after reviewing on July 22, 2021 / Accepted on August 01, 2021

**Abstract.** The purpose of this study is a comparative analysis of linear and radial increments of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a response to the growing conditions on the coast of the Kandalaksha Bay of the White Sea, as well as an evaluation of the temperature and precipitation influences of the current and previous growing seasons. These were applied to the conventional methods of measurement and data analysis. The dynamics of growth in height and diameter were employed as indicators of the stands' response to habitat conditions. A statistical analysis of the growth rates was performed, which vary depending on habitat type, as well as an assessment of the connection between biometric indicators of the stands and the amount of precipitation and mean temperature. The significant differences in the series of linear increment increases were found as distinctions between biotopes, but they were absent for the radial increment. Therefore, it is possible to monitor the typical behavior of tree diversity independent of the biotope type using radial growth series. This provides the foundation for a long-term retrospective analysis of environmental impact on the stands by using the annual rings of the trees without taking growing conditions into account. Precipitation was determined to be a limiting factor for radial and linear growth throughout the phenophase of internodal growth and early wood formation. Temperature was identified



as a limiting factor for radial development only during the stages of late wood formation and resource accumulation for the following growing season. The high sensitivity of linear increases to climatic conditions was revealed, which makes it useful as a criterion for assessing the state of forest ecosystems over short time periods (up to 30 years). However, this, in turn, dictates the impossibility of forming long-term linear increment series, as for radial growth, which is a significant limitation of this method. The choice of linear or radial growth analysis methods is concluded to be determined by the goals of the intended study, i.e., monitoring forest ecosystems under current climate change conditions or long-term paleoclimate analysis.

**Keywords:** Scots pine, linear increment, radial increment, biotope, precipitation sum, temperature, Kandalaksha Bay, the Republic of Karelia

**For citation:** Koukhta A.E., Maksimova O.V., Kuznetsova V.V. Influence of Climatic Factors on Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Growth on the Coast of the Kandalaksha Bay of the White Sea. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 4, pp. 105–119. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-105-119>

### Введение

Развитие и продуктивность растительных сообществ напрямую зависят от климатических факторов. Повышенной уязвимостью в условиях изменения климата характеризуются арктические фитоценозы. В последние десятилетия регистрируются различные климатогенные преобразования биомов тайги и тундры [8, 10, 14, 24]. Для успешного выявления трендов и прогнозирования состояния бореальных лесных биогеоценозов необходимо иметь информацию о том, какие метеорологические факторы являются лимитирующими для роста древостоев. Решению этой задачи посвящен ряд отечественных и зарубежных работ [8, 19, 20, 27].

Методы дендрохронологии с использованием рядов индексированных кольцевых приростов деревьев широко применяют с целью изучения многолетних взаимодействий климата и лесных экосистем. Получаемые данные содержат информацию об интегрированных откликах древостоев на воздействия температур, осадков и иных факторов внешней среды. В частности, дендрохронологический метод распространен при построении палеоклиматических реконструкций и исследованиях состояния экосистем прошлого [7, 22, 27]. В том числе известен ряд дендрохронологических исследований для побережья Белого моря [4, 5, 12].

В ранее опубликованных работах мы высказывали предположение, что параметры изменчивости радиального прироста в бореальных биотопах (а значит, и отклик на воздействие климатической системы) не зависят от характера условий произрастания. Получается, что дендрохронологические методы с использованием кольцевых хронологий применимы для оценок длительных периодов вне зависимости от условий произрастания [19, 20].

При использовании дендрохронологического метода в качестве исходных данных для анализа могут служить прирост в высоту и прирост по диаметру. Для более коротких временных периодов (до 30 лет) оценка отклика деревьев на внешние воздействия производится по приростам в высоту [19, 25]. Почки возобновления древесных пород, из которых развиваются междуузлия, в противоположность камбию, обеспечивающему рост дерева в ширину, представляют собой основную мишень прессинга метеорологических факторов [8, 19, 20]. Линейным приростам свойственна бóльшая, чем у радиальных, зависимость

от внешних факторов, и, следовательно, реакции на факторы внешней среды более очевидны. Ограничением метода дендрохронологии по линейным приростам в отличие от анализа по радиальным является короткий период, в течение которого возможно изучение климатического сигнала. Дендрохронологический метод, направленный на анализ прироста годичных колец и их различных параметров (ранняя, поздняя древесина, максимальная плотность, анатомические характеристики и проч.), широко используется для дендроклиматических реконструкций [11, 22, 27] и обладает большей протяженностью временных рядов по сравнению с анализом по линейному приросту. Поэтому оба метода в совокупности представляют интерес для изучения как регионального, так и локального климатического сигнала за разные временные интервалы [6, 19, 20].

Цель – проанализировать изменчивость линейных и радиальных приростов в зависимости от типа биотопа и выявить причины сходств/различий их динамики, а также определить лимитирующие рост древостоев климатические факторы в разных местообитаниях на побережье Белого моря.

#### *Объекты и методы исследования*

Исследование проведено в государственном комплексном (ландшафтном) заказнике регионального значения «Полярный круг», в Республике Карелия, на побережье Кандалакшского залива Белого моря (66°32' с. ш. 33°11' в. д.). Территория расположена в Кольско-Печорской подпровинции Евразийской таежной области, в Северо-европейской флористической провинции, на стыке 3 флористических районов – Имандровского, Варзугского и Топозерского. Преобладающим типом растительности являются северотаежные леса [10]. Мурманская область находится в Атлантико-арктической климатической области умеренного пояса, в зоне избыточного увлажнения [1]. Согласно Л.С. Бергу [6], средообразующими факторами в бореальных биогеоценозах являются гумидный климат, а также микро- и мезорельеф местности. Высокий уровень разнообразия ландшафтов обуславливает мозаичность местообитаний и многообразие условий произрастания.

В соответствии с классической типологией В.Н. Сукачева [13], выделены 3 основных типа местообитаний (биотопов): влажные, свежие и сухие. Влажные биотопы представляют собой сосняки сфагновые (*Pineta sylvestris fruticulososphagnosa*). Для свежих биотопов обычны сосновые древостои (*Pineta fruticulosohylocomiosa*) с примесью ели европейской (*Picea abies* (L.) Н. Karst.), березы повислой (*Betula pendula* Roth) и рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* Kom. ex Gatsch). В сухих биотопах, на так называемых китовых лбах – выходах скальных пород – обычны сосняки лишайниковые (*Pineta sylvestris cladinoso*) [13, 15].

Для анализа отклика древостоев сосны на изменения климатических параметров были использованы результаты измерений линейных приростов (т. е. годичных приростов междуузлий) сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., 1753 (класс Pinopsida, порядок Pinales, семейство Pinaceae) [10, 26].

Измерения линейных приростов подроста, молодняка и припевающих деревьев проводились в 2007 г. по методике, представленной в [8, 19]. Деревья указанных возрастных классов в рассматриваемых бореальных фитоценозах не превышают 2 м в высоту. Точность измерений определялась используемым средством измерений – мерной рулеткой. Пробные площади, каждая радиусом по 10 м, были заложены маршрутным методом в свежих (7 пробных площадей), сухих (8 пробных площадей) и влажных (4 пробных площади) местообитаниях

(всего 19 пробных площадей). На каждой пробной площади случайным образом отбиралось и измерялось по 5 деревьев одного класса возраста без видимых повреждений. Таким образом, в свежих биотопах рассматривалось ежегодно 35 деревьев, в сухих – 40, во влажных – 20 (всего 95 деревьев). У выбранных экземпляров определялись размеры междуузлия стволика/ствола начиная с верхнего и до последнего четко различимого над корневой шейкой. В результате этих измерений был получен архив за период 1980–2007 гг.

Для оценки параметров радиальных приростов взяты керны у 15 деревьев в свежих биотопах, в сухих биотопах – у 15 деревьев, во влажных – у 12. Используются дендрохронологические образцы сосны обыкновенной, отобранные из живых деревьев. Для каждой пробной площади измерена ширина годовых колец – радиальный прирост древесины. Измерения производились при помощи специализированной программы TsapWin (точность составляла 0,01 мм). Контроль качества образцов выполнялся с помощью программы Cofecha [21, 22]. Ко всем образцам применялось 100-летнее линейное сглаживание [18]. Этот фильтр позволяет удалить неклиматический сигнал из ряда дендрохронологических данных (ежегодный прирост годовых колец).

Ряды радиальных и линейных приростов индексировались, т. е. из них исключалась возрастная компонента. В дендрохронологических сериях возрастная тренд [16, 29] удалялся с помощью программы ARSTAN [17], для чего значение линейного прироста за каждый год поделено на значение точечной аппроксимирующей функции за этот год. Результатом такой процедуры служили динамические ряды индексов приростов, для которых становилось возможным проведение сравнения биометрических показателей деревьев разного возраста на воздействие климатических факторов с учетом мозаичности местообитаний изучаемых древостоев [7, 9, 11, 19, 20]. Для получения устойчивых выводов по отношению к анализу изменчивости индексов приростов и их связи с метеорологическими факторами производилось усреднение индексов по всем деревьям площадок указанного биотопа за каждый год.

Метеоданные получены с сайта Всероссийского Научно-исследовательского института Гидрометеорологической Информации (<http://meteo.ru/>) по данным метеорологической станции Кандалакшского государственного природного заповедника [2, 3]. Длина рядов метеоданных соответствует длине наблюдений за линейным и радиальным приростами – общий период для серий составляет 21 год, с 1984 по 2005 г.

Для исследования связи линейных и радиальных приростов со средними температурами и суммарными осадками выбирались периоды с июля по август предшествующего года и с апреля по август текущего. Данный период выбран для анализа, поскольку фенофаза активного роста почки возобновления длится с середины вегетационного сезона до осени.

Для первичного анализа вариабельности индексов линейных и радиальных приростов используется диаграмма box-and-whiskers (ящик с усами), которая позволяет проводить сравнение массивов разных объемов не только по медианным значениям (размечаемым внутри ящика), но и оценивать вариабельность каждой группы по размерам ящичков, границы которых задаются 1-м и 3-м квартилями [28]. Для статистической оценки влияния типа биотопа произрастания сосны на вариабельность ее линейных и радиальных приростов использовался непараметрический критерий Краскела–Уоллиса ( $H$ -критерий)

[23]. Этот критерий свободен от типа распределения данных, что при небольших объемах выборок, как в нашем случае, исключает возможность ошибок предположения нормальности данных. Критерий основывается на проверке равенства медиан нескольких групп [1],  $H$ -статистика критерия имеет вид

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^m \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1),$$

где  $n_i$  – число наблюдений в группе  $i$ ;  $N = \sum_{i=1}^m n_i$  – общее число наблюдений во всех  $m$  группах;  $R_i$  – сумма рангов наблюдений в группе  $i$ .

Данные как по линейному, так и по радиальному приростам междуузлий на территории заповедника за каждый отдельный год подвержены сильной вариабельности, поэтому для выявления корреляционных связей с осадками и температурами вместо использования среднего прироста за год выбрано его медианное значение. Медианы устойчивы к экстремальным значениям в выборке (выбросам) и тем самым дают более полное представление о «типичном» значении приростов междуузлий, чем простое среднее. Для оценки связи медиан индексов линейных приростов междуузлий сосны и суммарных атмосферных осадков, а также температур использовались коэффициенты корреляции Пирсона ( $r$ ) с оценкой значимости по критерию Стьюдента на уровне  $\alpha = 0,05$ . Для реализации корреляционно-регрессионного анализа временных рядов и статистического оценивания применялись программный модуль Statistica 15 и пакет Excel 2016.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

*Вариабельность линейных и радиальных приростов в различных типах биотопов.* Ранее проведенные нами исследования позволили установить, что изменчивость приростов как показатель отклика древостоев на воздействие внешних факторов зависит от типа местопроизрастания [7, 9, 19, 20]. В данной работе индексы линейных и радиальных приростов также представлены для 3 типов биотопов: свежий, влажный и сухой [13]. Для оценки влияния типа биотопа на линейные и радиальные приросты сосны взят период с 1984 по 2005 г., так как для этого периода имеются сопоставимые ряды индексов приростов. Вариабельность приростов визуальна представлена на рис. 1 в виде диаграммы box-and-whiskers [28], отображающей различия изменчивости от года к году в каждом биотопе как в интерквартильном разбросе ( $IQR$ ), так и в размахе этих значений ( $R$ ).

Визуальный анализ показателя вариабельности  $IQR$  для индексов линейных и радиальных приростов выявил следующее. Для линейных приростов продемонстрирована меньшая межгодовая изменчивость во влажных и сухих биотопах по сравнению со свежими (рис. 1, *a*). Это объясняется тем, что в данном биоме свежие биотопы представляют собой зону экологического оптимума для сосны, а сухие и влажные местообитания – зону пессимума, где, согласно одному из основных экологических принципов – закону Шелфорда, отмечено жесткое лимитирование по ряду ресурсов, в том числе по количеству влаги в субстрате. Следовательно, как показано в наших ранее опубликованных работах [8, 19], давление естественного отбора в свежих биотопах ниже, чем в сухих и влажных. Межгодовая изменчивость индексов радиальных приростов визуальна больше, но от биотопа к биотопу различия  $IQR$  явно не выражены (рис. 1, *b*).

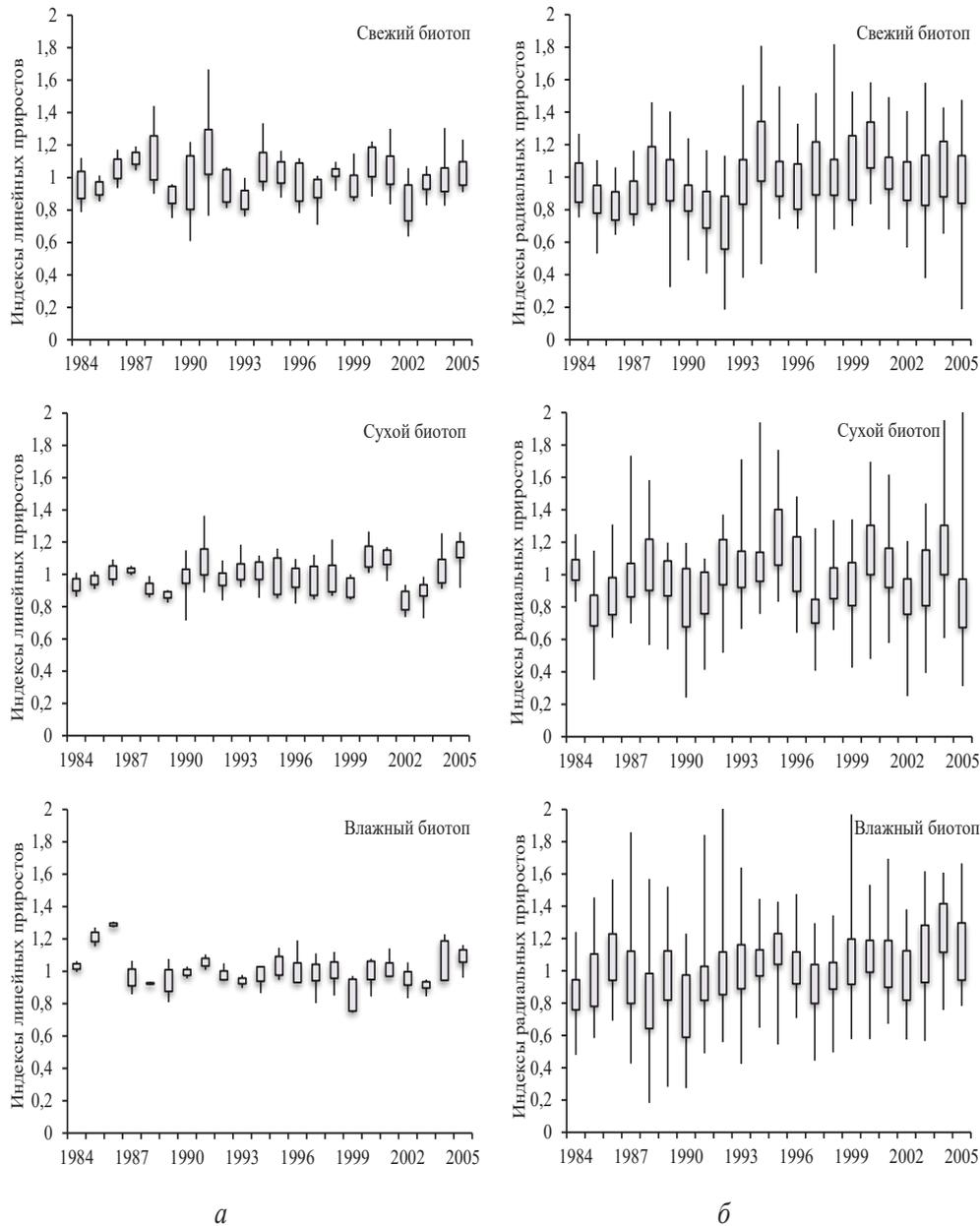


Рис. 1. Диаграммы для индексов приростов сосны в 3 типах биотопов заказника «Полярный круг» с 1984 по 2005 г.: а – линейных; б – радиальных

Fig. 1. Box-and-whiskers plots for Scots pine increment indices in three biotope types of the Polar Circle Nature Reserve from 1984 to 2005: а – linear; б – radial

Статистическое сравнение рядов показателей  $IQR$  для разных типов биотопов с помощью непараметрического  $H$ -критерия выявило:

значимые отличия  $IQR$  для индексов линейных приростов от биотопа к биотопу ( $p = 0,008 < \alpha$ ), при этом в свежих биотопах  $IQR$  значимо больше;

незначимые отличия  $IQR$  для индексов радиальных приростов ( $p = 0,8213 > \alpha$ ).

Таким образом, характеристики различных типов биотопов следует признавать разными с точки зрения воздействия на линейные приросты при уровне значимости  $\alpha$  и с точки зрения воздействия на радиальные приросты. Гистограммы, составленные для показателя  $IQR$ , имеют колоколообразный вид для радиальных приростов (рис. 2) и тем самым дополнительно показывают однородность их вариабельности от биотопа к биотопу в отличие от гистограмм для линейных приростов. Это означает, что характер изменчивости радиальных приростов (и, следовательно, их отклик на воздействие факторов среды) сходен в разных типах биотопов, т. е. во всех условиях произрастания.

В отличие от радиальных приростов параметры изменчивости линейных приростов не дают статистического подтверждения сходства от биотопа к биотопу, параметры вариабельности  $IQR$  значимо различаются для влажных, сухих и свежих местообитаний.

Дополнительное исследование равенства медианных значений индексов радиальных приростов (в условиях статистической незначимости различий вариабельности) по  $H$ -критерию также показывает незначимые отличия: полученная расчетная статистика критерия  $p = 0,8338 > \alpha$ . Это подтверждает независимость радиальных приростов сосны от типа биотопа, что дает возможность наблюдать за данными показателями вне зависимости от местообитания. Дополнительный анализ массивов индексов радиальных приростов во времени также выявил однородность от биотопа к биотопу, что является еще одним доказательством возможности проведения анализ отклика прироста на воздействие климатических факторов вне зависимости от типа биотопа.

*Связь линейных и радиальных приростов со средними температурами и суммарными осадками.* Изменчивость параметров роста сосны в высоту зависит от типа биотопа, т. е. линейный прирост более подвержен случайному влиянию различных факторов среды обитания. Для оценки связи прироста с климатическими параметрами целесообразно рассматривать связь с его медианными значениями как центральной тенденцией выборки. Ввиду полученных значимых различий вариабельности индексов линейных приростов относительно типа биотопа далее исследуются медианные значения и радиальных, и линейных приростов для сопоставимости результатов. Как было отмечено, проводить наблюдения за типичным поведением изменчивости радиальных приростов возможно вне зависимости от типа биотопа, поэтому далее будем рассматривать для индексов радиальных приростов общий массив данных. Выделим 2 периода текущего года: апрель–май, когда происходит активный рост в высоту, а радиальный прирост осуществляется за счет ранней древесины (в этот период апикальный рост зачастую доминирует над ростом ствола в ширину), и июнь–август, когда доминирует кольцевой прирост (за счет образования поздней древесины), а междоузлия замедляют и в дальнейшем прекращают развитие. Для прошлого вегетационного сезона выделим август–сентябрь как период формирования сосной почек возобновления, обеспечивающих рост побегов в следующем году. Рассчитанные коэффициенты корреляции с величинами суммарных атмосферных осадков вегетационных периодов показывают (табл. 1):

значимые положительные связи наблюдаются в период апреля–мая текущего года как для радиальных приростов ( $r = 0,35$ ), так и для линейных по краям экологической ниши (в сухих биотопах  $r = 0,32$  и во влажных  $r = 0,35$ ); в период августа–сентября прошлого года отмечается значимая связь для линейных приростов в сухих биотопах ( $r = 0,34$ );

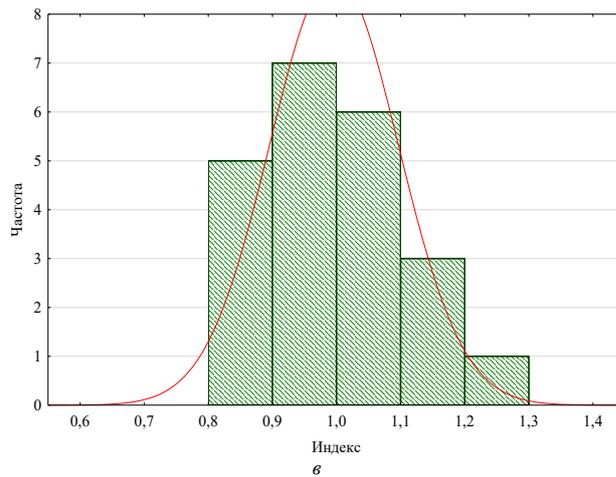
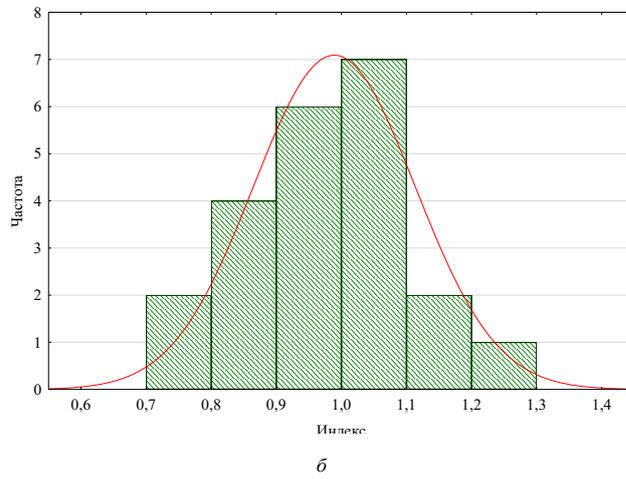
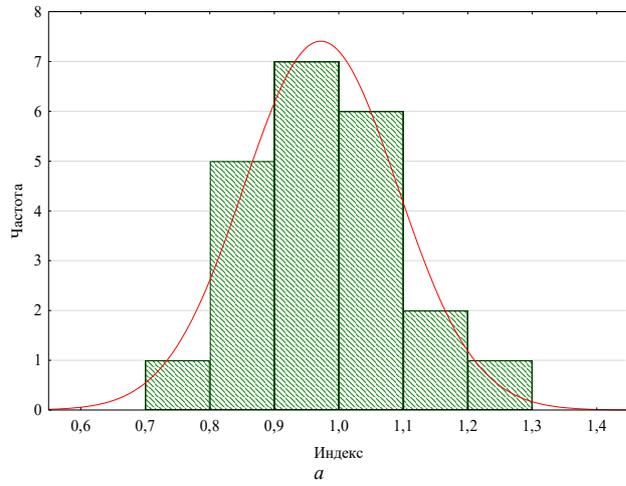


Рис. 2. Гистограммы для показателя варибельности  $IQR$  индексов радиальных приростов в различных биотопах, 1984–2005 гг.:  $a$  – свежий;  $б$  – сухой;  $в$  – влажный

Fig. 2. Histograms for  $IQR$  variability of radial increment indices in different biotopes, 1984–2005 years:  $a$  – fresh;  $б$  – dry;  $в$  – moist

значимые отрицательные связи обнаружены только для линейных приростов во всех биотопах в период июня–июля текущего года ( $r = -0,43; -0,30; -0,37$ ) для свежих, влажных и сухих биотопов соответственно.

Таблица 1

**Коэффициенты корреляции между медианами индексов линейных и радиальных приростов сосны и суммами осадков за 1986–2005 гг.**  
**Correlation coefficients between medians of pine linear and radial increments indices and total precipitation level between 1986–2005 years**

Период осадков	Индексы приростов для биотопа			
	линейных			радиальных
	свежий	сухой	влажный	объединенный
Апрель–май текущего года	0,11	<b>0,32</b>	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>
Июнь–июль текущего года	<b>-0,43</b>	<b>-0,30</b>	<b>-0,37</b>	–
Июнь–август текущего года	–	–	–	-0,07
Август–сентябрь прошлого года	0,12	<b>0,34</b>	0,08	0,05

Примечание: Здесь и в табл. 2 полужирным шрифтом выделены индексы, значимые на уровне 0,05.

Причина положительной связи линейных приростов в сухих биотопах с осадками в начале лета очевидна: этот период – фенофаза апикального роста, в течение которой формирование междоузлий требует наличия дефицитной в данных условиях произрастания влаги. Во 2-й половине фенофазы роста междоузлий атмосферные осадки являются причиной вымывания и обеднения субстрата, на котором развивается корневая система сосны, и, следовательно, снижения длины междоузлий. Положительные связи приростов с осадками августа–сентября предыдущего вегетационного периода объясняются тем, что осадки компенсируют недостаток влаги, необходимой для развития почек возобновления и, соответственно, прироста следующего года.

Во влажных биотопах в начале лета атмосферные осадки, поступая в холодную и закисленную среду обитания корневой системы деревьев, делают влагу доступной для успешного роста междоузлий. В середине вегетационного сезона избыток осадков, напротив, вызывает у деревьев водный стресс, из-за чего рост дерева в высоту замедляется. Этим объясняется отрицательное значение коэффициента корреляции между осадками и линейным приростом в середине лета во влажных биотопах.

В свежих биотопах древостои не испытывают дефицита влаги. Кроме того, район исследований относится к области избыточного увлажнения [1, 7], и при поступлении осадков во 2-й половине фенофазы роста междоузлий деревья также испытывают водный стресс, препятствующий оптимальному формированию кроны. Следовательно, коэффициент корреляции имеет отрицательное значение.

В отличие от линейных радиальные приросты положительно связаны с количеством осадков лишь в начале фенофазы формирования ранней древесины. В дальнейшем в течение вегетационного сезона рост стволов в ширину не связан с поступлением атмосферной влаги.

Коэффициенты корреляции линейных и радиальных приростов со средними температурами представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции между медианами индексов линейных и радиальных приростов сосны и средними температурами за 1986–2005 гг.**  
**Correlation coefficients between medians of pine linear and radial increments indices and mean temperatures between 1986–2005 years**

Период осадков	Индексы приростов для биотопа			
	линейных			радиальных
	свежий	сухой	влажный	объединенный
Апрель–май текущего года	–0,04	–0,06	–0,21	0,13
Июнь–июль текущего года	–0,17	–0,06	–0,21	–
Июнь–август текущего года	–	–	–	<b>0,41</b>
Август–сентябрь прошлого года	<b>–0,32</b>	0,09	0,26	<b>0,43</b>

Значимая положительная связь со средними температурами в период активного радиального прироста сосны (июнь–август текущего года,  $r = 0,41$ ) и период прошлого года (август–сентябрь,  $r = 0,43$ ) с индексами радиальных приростов обусловлена необходимостью набора сумм эффективных температур для успешного прохождения фенофазы формирования поздней древесины в текущем сезоне и накопления ресурса для роста ствола в будущем году. Напротив, для индексов линейных приростов в свежих биотопах наблюдается значимая отрицательная связь со средними температурами августа–сентября прошлого года ( $r = -0,32$ ) по причине негативного воздействия повышения температур (и, как следствие, нехватки влаги) на качество почек возобновления и прироста в высоту на следующий год.

На величину кольцевого прироста текущего года помимо рассмотренных факторов влияет множество других, таких как содержание  $\text{CO}_2$  в воздухе, обеспеченность почвы минеральными элементами, лесорастительные условия и др. Поэтому полученные коэффициенты корреляции радиального прироста с суммарными осадками и средними температурами отражают значимую связь, но не подтверждают прямую зависимость.

### Заключение

На материале исследования древостоев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* комплексного (ландшафтного) заказника «Полярный круг», расположенного на побережье Кандалакшского залива Белого моря, показано, что связь параметров изменчивости радиальных приростов с характером местообитания статистически незначима. Следовательно, отклик данных показателей на воздействие внешних (в том числе климатических) факторов можно ожидать сходным и в сухих, и в свежих, и во влажных биотопах. Это дает основание к осуществлению долгосрочного ретроспективного анализа взаимоотношений древостоев и среды с использованием древесно-кольцевых хронологий без учета условий произрастания.

Обнаружено несходство отклика линейных приростов на воздействие климатических факторов в сухих, влажных и свежих биотопах. Другими словами, тип биотопа является существенным условием для формирования характера изменчивости длин междуузлий. Указанная закономерность позволяет отделить климатически обусловленные реакции от межгодовой индивидуальной изменчивости деревьев, т. е. до определенной степени снизить уровень «шума», маскирующего искомые тренды.

Подтверждена роль осадков как лимитирующего фактора для радиальных и линейных приростов (для последних – в сухих и влажных биотопах, т. е. в зонах экологического пессимума) в ходе фенофазы роста междуузлий и развития ранней древесины. Лимитирующая роль температур выявлена для радиальных приростов лишь на этапах формирования поздней древесины и накопления ресурсов для роста в следующем вегетационном сезоне. Линейные приросты в отличие от радиальных статистически значимо зависят от температур и осадков в ходе всех фенофаз текущего и предыдущего вегетационного сезонов и поэтому более репрезентативны при осуществлении мониторинга лесных экосистем, хотя и неприменимы для создания длительных хронологий из-за коротких рядов измерений.

Таким образом, линейные приросты (с учетом их чувствительности к воздействиям климатических факторов) являются более информативным инструментом оценки состояния лесных экосистем за короткий (до 30 лет) период, чем радиальные. Однако основным ограничением при использовании линейных приростов для анализа зависимости хода роста сосны от климатических факторов становится невозможность формирования многолетних рядов, таких, как для радиальных приростов, в силу возрастных изменений деревьев.

Выбор методов анализа по линейным или по радиальным приростам определяется целями планируемого исследования – мониторинга лесных экосистем в современных условиях изменения климата или долгосрочного палеоклиматического анализа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алисов Б.П. Климат СССР. М.: Моск. ун-т, 1956. 128 с.  
Alisov B.P. *Climate of the USSR*. Moscow, Moscow State University Publ., 1956. 128 p. (In Russ.).
2. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Корицунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 21.03.21).  
Bulygina O.N., Razuvayev V.N., Korshchnova N.N., Shvets N.V. *Description of the Data Set of Monthly Precipitation Totals at the Stations in Russia*. Database of All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. Certificate of state registration of the database №. 2015620394. (In Russ.).
3. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России: Свидетельство о государственной регистрации базы данных №. 2014621485. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения: 22.03.21).  
Bulygina O.N., Razuvayev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. *Description of the Data Set of the Mean Monthly Air Temperature at the Stations in Russia*. Database of

All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. Certificate of state registration of the database No. 2014621485. (In Russ.).

4. Долгова Е.А., Мацковский В.В., Соломина О.Н. Дендрохронология Соловецких островов // География: развитие науки и образования. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2018. Т. 1. С. 394–398.

Dolgova E.A., Matskovskiy V.V., Solomina O.N. Dendrochronology of the Solovetsky Islands. *Geografiya: razvitiye nauki i obrazovaniya*. Vol. 1. Sankt Petersburg, A.I. Herten Russian State Pedagogical University Publ., 2018, vol. 1. pp. 394–398. (In Russ.).

5. Долгова Е.А., Соломина О.Н., Мацковский В.В., Добрянский А.С., Семеняк Н.А., Шпунт С.С. Пространственная изменчивость прироста сосны на Соловецких островах // Изв. РАН. Сер.: Географическая. 2019. № 2. С. 41–50.

Dolgova E.A., Solomina O.N., Matskovskiy V.V., Dobryanskiy A.S., Semenyak N.A., Shpunt S.S. Spatial Variation of Pine Tree-Ring Growth in the Solovetsky Islands. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2019, no. 2, pp. 41–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019241-50>

6. Кузнецова В.В., Чернокульский А.В., Козлов Ф.А., Кухта А.Е. Связь линейного и радиального прироста сосны обыкновенной с осадками разного генезиса в лесах Керженского заповедника // Изв. РАН. Сер.: Географическая. 2020. № 1. С. 93–102.

Kuznetsova V.V., Chernokulskiy A.V., Kozlov F.A., Kukhta A.E. Connection Between the Linear and Radial Growth of Scots Pine with Sediments of Different Genesis in the Forests of the Kerzhensky Reserve. *Izvestiya RAN, Seriya Geograficheskaya*, 2020, no. 1, pp. 93–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556620010124>

7. Кухта А.Е. Влияние температуры и осадков на годичный линейный прирост сосны обыкновенной на берегах Кандалакшского залива // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2009. № 1. С. 61–67.

Kukhta A.E. Influence of Temperature and Precipitation on the Annual Linear Growth of Scots Pine on the Shores of the Kandalaksha Bay. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2009, no. 1, pp. 61–67. (In Russ.).

8. Кухта А.Е., Попова Е.Н. Климатический сигнал в линейном приросте сосны обыкновенной бореальных фитоценозов побережья Белого моря // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2020. Т. 31, № 3-4. С. 33–45.

Kukhta A.E., Popova E.N. Climatic Signal in the Linear Growth of Scots Pine in Boreal Phytocenoses of the White Sea Coast. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ecosystem*, 2020, vol. 31, no. 3-4, pp. 33–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2020-3-33-45>

9. Кухта А.Е., Румянцев Д.Е. Линейный и радиальный приросты сосны обыкновенной в Волжско-Камском и Центрально-Лесном государственных природных заповедниках // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2010. № 3. С. 88–93.

Kukhta A.E., Rumyantsev D.E. Linear and Radial Increments of Scots Pine in the Volga-Kama and Central-Forest State Natural Reserves. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2010, no. 3, pp. 88–93. (In Russ.).

10. Раменская М.Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, 1983. 215 с.

Ramenskaya M.L. *Analysis of the Flora of Murmansk Region and Karelia*. Leningrad, Nauka Publ., 1983. 215 p. (In Russ.).

11. Румянцев Д.Е., Епишков А.А., Липаткин В.А., Волкова Г.Л. Статистические закономерности изменчивости временных рядов радиального прироста сосны обыкновенной по показателям синхронности на территории Русской равнины // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 5. С. 688.

Rumyantsev D.E., Lipatkin V.A., Epishkov A.A., Volkova G.L. Statistical Patterns of Variability in the Time Series of the Radial Growth of Scots Pine in Terms of Synchronism in the Territory of the Russian Plain. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern Problems of Science and Education, 2015, no. 5, art. no. 688. (In Russ.).

12. Соломина О.Н., Мацковский В.В., Жуков Р.С. Дендрохронологические «летописи» «Вологда» и «Соловки» как источник данных о климате последнего тысячелетия // Докл. Акад. наук. 2011. Т. 439, № 4. С. 539–544.

Solomina O.N., Matskovskiy V.V., Zhukov R.S. The Vologda and Solovki Dendrochronological «Chronicles» as a Source of Information About the Climate Conditions of the Last Millennium. *Doklady Akademii nauk*, 2011, vol. 439, no. 4, pp. 539–544. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1028334X11080071>

13. Сукачев В.Н. Избранные труды: в 3 т. Т. 1. Основы лесной типологии и биогеоценологии / под общ. ред. Е.М. Лавренко. Л.: Наука, 1972. 419 с.

Sukachev V.N. *Selected Works in Three Volumes. Vol. 1: Fundamentals of Forest Typology and Biogeocenology*. Ed. by E.M. Lavrenko. Leningrad, Nauka Publ., 1972. 419 p. (In Russ.).

14. Тишков А.А., Кренке-мл. А.Н. «Позеленение» Арктики в XXI в. как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения // Арктика: экология и экономика. 2015. № 4(20). С. 28–37.

Tishkov A.A., Krenke Jr. A.N. «Greening» of the Arctic in the XXI Century as a Synergistic Effect of Global Warming and Economic Development. *Arktika: ekologiya i ekonomika* = Arctic: Ecology and Economy, 2015, vol. 4(20), pp. 28–37. (In Russ.).

15. Ценофонд лесов Европейской России. Режим доступа: <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/princip.htm> (дата обращения: 02.03.21).

*Typological Diversity of Forests in European Russia*. Database: Price Fund of European Russia.

16. Cook E.R., Holmes R.L. Guide for Computer Program ARSTAN. *The International Tree-Ring Data Bank Program Library Version*, 1996, vol. 2, pp. 75–87.

17. Cook E., Peters K. The Smoothing Spline: A New Approach to Standardizing Forest Interior Tree-Ring Width Series for Dendroclimatic Studies. *Tree-Ring Bulletin*, 1981, vol. 41, pp. 45–53.

18. Chernogaeva G.M., Kuhta A.E. The Response of Boreal Forest Stands to Recent Climate Change in the North of the European Part of Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2018, vol. 43, no. 6, pp. 418–424. <https://doi.org/10.3103/S1068373918060109>

19. Chernogaeva G.M., Kuznetsova V.V., Kukhta A.E. Precipitation Effects on the Growth of Boreal Forest Stands in the Volga Region. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 45, no. 12, pp. 851–857. <https://doi.org/10.3103/S1068373920120055>

20. Dolgova E., Cherenkova E., Solomina O., Matskovsky V. Influence of the Large-Scale Atmospheric Circulation Variations on Spruce Tree-Ring Growth from Solovki Islands (Russia). *Practical Geography and XXI Century Challenges. Proceedings of International Geographical Union Thematic Conference dedicated to the Centennial of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 4–6 June 2018*. Moscow, Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Geography RAS Publ., 2018, pp. 96.

21. Grissino-Mayer H.D. Evaluating Crossfading Accuracy: A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA, 2001, pp. 205–221.

22. Holmes R.L. Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, vol. 43, pp. 69–78.

23. Kruskal W.H., Wallis W.A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 1952, vol. 47, no. 260, pp. 583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>

24. Matskovsky V., Kuznetsova V., Morozova P., Semenyak N., Solomina O. Estimated Influence of Extreme Climate Events in the 21st Century on the Radial Growth of Pine Trees in Povolzhie Region (European Russia). *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 611, no. 1, art. no. 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/611/1/012047>
25. Misi D., Puchalka R., Pearson C., Robertson I., Koprowski M. Differences in the Climate-Growth Relationship of Scots Pine: A Case Study from Poland and Hungary. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 3, p. 243. <https://doi.org/10.3390/f10030243>
26. *Pinus sylvestris*. The Gymnosperm Database. Available at: [https://www.conifers.org/pi/Pinus\\_sylvestris.php](https://www.conifers.org/pi/Pinus_sylvestris.php) (accessed 21.03.20).
27. Thabeet A., Vennetier M., Gadbin-Henry C., Dendelle N., Roux M., Caraglio Y., Vila B. Response of *Pinus sylvestris* L. to Recent Climatic Events in the French Mediterranean Region. *Trees*, 2009, vol. 23, no. 4, pp. 843–853. <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0326-z>
28. Tukey J.W. Comparing Individual Means in the Analysis of Variance. *Biometrics*, 1949, vol. 5, no. 2, pp. 99–114. <https://doi.org/10.2307/3001913>
29. Wilson R., Anchukaitis K., Briffa K.R., Büntgen U., Cook E., Darrigo R., Davi N., Esper J., Frank D., Gunnarson B., Hegerl G. Last Millennium Northern Hemisphere Summer Temperatures from Tree Rings. Part I: The Long-Term Context. *Quaternary Science Reviews*, 2016, vol. 134, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.12.005>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest