
Сравнительный анализ изменчивости линейных и радиальных приростов сосны обыкновенной в разных типах местообитаний государственного природного заповедника «Кивач»

*О.В. Максимова^{1,2)}, А.Е. Кухта¹⁾**

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Россия, 107058, Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾ Университет МИСИС, Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, 4

*Адрес для переписки: anna_koukhata@mail.ru

Реферат. Проведен анализ вариабельности линейных и радиальных приростов сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* в различных типах местообитаний государственного природного заповедника «Кивач». Целью данной работы является апробация ранее разработанного подхода оценки воздействия условий произрастания сосны обыкновенной на статистические характеристики рядов её линейных и радиальных приростов. Для сбора данных и их подготовки к исследованиям были использованы стандартные методы анализа дендрохронологических архивов. Статистически подтверждено сходство динамики радиальных приростов и несходство динамики линейных приростов в сухих, влажных и свежих биотопах. Показана независимость параметров изменчивости радиальных приростов от характера местообитания за каждый год исследования. Подтверждён вывод, что выбор объектов анализа – линейных или радиальных приростов – диктуется целями планируемого исследования: мониторинга лесных экосистем в современных условиях изменения климата или исследований климатов прошлого. При ретроспективной оценке воздействия климатов прошлого на лесные биогеоценозы тип биотопа не влияет на результаты исследования. В то же время мониторинг древостоев методом анализа линейных приростов следует осуществлять с учетом характера местообитания.

Ключевые слова. Сосна обыкновенная, параметры хода роста, линейный прирост, радиальный прирост, тип биотопов.

Comparative analysis of Scots pine lineal and radial increments variability in different types of habitats of the "Kivach" state nature reserve

*O.V. Maksimova^{1,2)}, A.E. Koukhata¹⁾**

¹⁾Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, 20B, Glebovskaya str., 107058, Moscow, Russian Federation

Abstract. An analysis of the Scots pine *Pinus sylvestris* linear and radial increment variability in the State Nature Reserve "Kivach" in various types of habitats was performed. The purpose of this work is to test a previously developed approach for assessing the Scots pine growing conditions impact on the statistical characteristics of its linear and radial growth series. To collect data and prepare them for research, standard methods for analyzing dendrochronological archives were used. The similarity of the radial increment dynamics and the dissimilarity of the of linear increment dynamics in dry, wet and fresh biotopes were statistically confirmed. The independence of variability parameters of radial increments from the nature of the habitat for each year of the study is shown. The conclusion is confirmed that the choice of analysis objects – linear or radial increments – is dictated by the planned study goals (forest ecosystems monitoring in modern conditions of climate change or past climates studies). In a retrospective impact assessment of past climates on forest biogeocenoses, the type of biotope does not affect the results of the study. At the same time, forest stands monitoring by the linear increments analysis should be carried out taking into account the biotope character.

Keywords. Scotch pine, variability, linear growth, radial growth, habitats.

Введение

Климатическая система Земли оказывает прямое воздействие на развитие и продуктивность фитоценозов, в особенности на бореальные лесные экосистемы (Тишков и др., 2021; Тишков, Кренке, 2015; Chernogaeva, Kuhta, 2018; Chernogaeva et al., 2020). Для выявления отклика древостоев на регистрируемые в последние десятилетия изменения климата широко применяются методы оценки изменчивости радиальных (древесных колец) и линейных (междуузлий) приростов деревьев (Кузнецова и др., 2020; Кухта, Попова, 2020; Тишков и др., 2021; Тишков, Кренке, 2015; Chernogaeva, Kuhta, 2018; Chernogaeva et al., 2020).

К методу дендрохронологии с использованием годичных радиальных приростов деревьев прибегают для оценки воздействия климатической системы на леса в течение длительных промежутков времени (столетий). Указанный метод позволяет осуществлять ретроспективный анализ откликов древостоев на воздействия климатических факторов и поэтому широко применяется при исследованиях состояния экосистем прошлого и при построении палеоклиматических реконструкций (Долгова и др., 2018; Кузнецова и др., 2020; Dolgova et al., 2018; Dolgova et al., 2019; Kruskal, Wallis, 1952).

Линейные приросты сосны обыкновенной обнаруживают большую, чем радиальные, чувствительность к климатическим факторам, под прямым воздействием которых находятся апикальные почки, формирующие междуузлия. Однако использованию линейных приростов в дендрохронологии присуще и

ограничение – короткие (до 30 лет) периоды измерений. Вероятно, вследствие указанной причины, несмотря на важность показателей роста междоузлий при изучении состояния крон и фотосинтезирующего аппарата деревьев, оценка динамики линейных приростов привлекает внимание небольшой группы зарубежных и отечественных авторов (Кухта, Попова, 2020; Chernogaeva, Kuhta, 2018; Chernogaeva et al., 2020; Jansons et al. 2013; Misi et al. 2019), в сравнении с кольцевыми приростами.

Как показано в предыдущих исследованиях (Максимова, Кухта, 2022; Chernogaeva, Kuhta, 2018; Chernogaeva et al., 2020), методы с использованием как радиальных, так и линейных приростов, применимы для изучения климатических сигналов в лесных экосистемах на разных временных интервалах. Однако инструментарий оценки отклика древостоев на воздействие климатических факторов с использованием линейных и кольцевых хронологий требует развития и уточнения областей применения данных методов. Для решения этой проблемы нами был ранее разработан и применён подход сравнительного анализа изменчивости линейных и радиальных приростов сосны обыкновенной в зависимости от условий обитания. Впервые этот подход был применен для сосняков, произрастающих в различных типах биотопов государственного природного заказника «Полярный круг» (Максимова, Кухта, 2022).

Цель настоящей работы – апробация ранее разработанного способа оценки воздействия условий произрастания *P. sylvestris* на статистические характеристики рядов её линейных и радиальных приростов.

В настоящей работе решается следующая задача: применить и апробировать разработанный ранее подход к оценке близости (степени синхронности) динамических рядов индексов линейных и радиальных приростов сосны, произрастающей на территории государственного природного заповедника «Кивач».

Методы и материалы

Объектом исследования служили ряды радиальных и линейных приростов сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., 1753 (класс *Pinopsida*, порядок *Pinales*, семейство *Pinaceae*)¹.

Измерения приростов *P. sylvestris* проводились на территории государственного природного заповедника «Кивач», расположенного в Республике Карелия, в Кондопожском районе (62°16' N, 33°58' E).

Рассматриваемая территория по климатическому районированию Б.П. Алисова входит в Атлантико-Арктическую область умеренного пояса (Алисов, 1956). Флора данной особо охраняемой природной территории (ООПТ) типична для южной части полосы осветленных лесов подзоны северной тайги на южной границе Гипоарктического ботанико-географического пояса. По

¹Gymnosperm Database (https://www.conifers.org/pi/Pinus_sylvestris.php) (дата обращения 20.03.2023)

скандинавской геоботанической классификации это территория двух ботанико-географических провинций Восточной Фенноскандии – *Karelia pomorica occidentalis* (Крос) и *Karelia pomorica orientalis* (Крос), практически совпадающих с Кемским и Выгозерским флористическими районами (Раменская, 1983).

Разработанный нами ранее подход к оценке степени синхронности динамических рядов индексов линейных и радиальных приростов был применён для сосняков заказника «Полярный круг», расположенного в Республике Карелия, на побережье Кандалакшского залива Белого моря (66°32' N, 33°11' E) (Максимова, Кухта, 2022). Исследования были проведены на территории, относящейся к Кольско-Печорской подпровинции Евроазиатской таежной области, Североевропейской флористической провинции, на стыке трех флористических районов – Имандровского, Варзугского и Топозерского. Преобладающим здесь является бореальный (северо-таежный) тип растительности (Раменская, 1983; База данных «Ценофонд...», 2021).

Экосистемы заповедника «Кивач» (так же, как и заказника «Полярный круг») относятся к таёжному биому. Средообразующими факторами в бореальных биогеоценозах, согласно Л.С. Бергу, наряду с гумидным климатом, являются микро- и мезорельеф местности, формирующие мозаичность и многообразие местообитаний (Берг, 1922). В соответствии с классической типологией В.Н. Сукачева (Сукачев, 1972), в бореальных экосистемах, к которым относятся фитоценозы заповедника «Кивач», выделены три основных типа местообитаний (биотопов): влажные биотопы – сосняки сфагновые (*Pineta sylvestris fruticuloso-sphagnosa*); свежие биотопы – сосняки зеленомошные с примесью ели европейской, берёзы повислой, рябины обыкновенной (*Pineta fruticuloso-hylocomiosa*); сухие биотопы – сосняки лишайниковые (*Pineta cladinoso*) (База данных «Ценофонд...», 2021).

В 2004 г. в заповеднике «Кивач» по стандартной методике, представленной, в частности, в (Максимова, Кухта, 2022; Кухта, Попова, 2020; Chernogaeva, Kuhta, 2018), проводились измерения подроста и молодняка деревьев в разных типах местообитаний. Возраст деревьев составлял 14-34 лет. Пробные площади радиусом по 10 м были заложены маршрутным методом в свежих (13 пробных площадей), сухих (3 пробных площади) и влажных (9 пробных площадей) биотопах (всего 25 пробных площадей). На каждой пробной площади случайным образом отбиралось для анализа по 5 деревьев без видимых повреждений. Общее количество обследованных экземпляров составило 125. У измеряемых особей определялись размеры междуузлия стволика/ствола, начиная с верхнего и до последнего, четко различимого над корневой шейкой. Таким образом был получен архив данных за период с 1974 по 2002 гг.

Для оценки параметров радиальных приростов использованы дендрохронологические образцы *P. sylvestris* из живых деревьев. Возраст деревьев на всех пробных площадях превышал 45 лет. Кernels отобраны из 5 деревьев в свежих, 5 – в сухих, 5 – во влажных биотопах. Приросты измерялись при помощи специализированной программы TsapWin (Matskovsky et al.,

2020); контроль качества образцов был выполнен с использованием программы COFESHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

Для получения возможности сравнения параметров изменчивости деревьев разного возраста проводилось сглаживание, т.е. из рядов измерений удалялась возрастная компонента (Максимова, Кухта, 2022; Кухта, Попова, 2020; Кузнецова и др., 2020). Для этого ряды линейных приростов индексировались методом деления значения за каждый год на скользящее среднее по 5 годам. В дендрохронологических кольцевых сериях возрастной тренд был удалён с помощью программы ARSTAN (Bradley, 2015; Cook, Holmes, 1996; Rinn, Jäkel, 1996). Для этого значение линейного прироста за каждый год было поделено на значение точечной аппроксимирующей функции за этот год (Кухта, 2009; Кухта, Румянцев, 2010; Chernogaeva, Kuhta, 2018; Chernogaeva et al., 2020).

Изучение вариабельности индексов линейных и радиальных приростов в работе велось поэтапно:

- визуальный анализ диаграмм *boxplot*;
- сравнение изменчивости разброса с применением критерия Краскела-Уоллиса;
- сравнение расчетных коэффициентов попарного сравнения близости показателей вариабельности динамических рядов по всему массиву, введенных ранее при анализе вариабельности приростов сосны Кандалакшского залива (Максимова, Кухта, 2022).

Изучение средних индексов линейных и радиальных приростов велось с использованием медиан, так как они устойчивы к экстремальным значениям (выбросам), а значит в полной мере дают характеристику «типичных» значений приростов междуузлий и годичных колец. Связь между медианами в динамике рассматривалась также поэтапно с применением следующих шагов:

- сравнение изменчивости медиан в случае, если изменчивость в разбросе индексов признавалась статистически незначимо отличающейся от биотопа к биотопу, с применением критерия Краскела-Уоллиса;
- анализ скользящих коэффициентов корреляции Пирсона (r) с оценкой значимости по критерию Стьюдента на уровне;
- сравнение коэффициентов попарной близости медиан динамических рядов по всему массиву (2) в случае, если предыдущие шаги показывали сходство в динамике для индексов.

Опишем кратко каждый используемый статистический критерий, применяемый в исследовании.

1. Диаграмма «box-and-whiskers» (по-другому, «ящик с усами» (Тьюки, 1981)) широко применяется в статистике для первичного сравнения выборок (совокупностей) разных объемов как по медианным значениям (размечаемым внутри ящика), так и по вариабельности каждой группы по размерам ящиков, границы которых задаются первой и третьей квантилями.

2. Непараметрический критерий Краскела-Уоллиса (H -критерий), который есть альтернатива одномерному дисперсионному анализу (Kruskal, Wallis, 1952), использовался при статистической оценке влияния типа биотопа

произрастания сосны на вариабельность/медианы линейных и радиальных приростов. Критерий свободен от типа распределения данных, что при небольших объемах выборок, как в нашем случае для линейных приростов, освобождает от предположения и проверки нормальности данных. Критерий основывается на проверке равенства медиан нескольких групп на основе анализа H -статистики

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

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

3. Расчет показателя $V_{\text{ско}_{\text{связи}}}$ осуществлялся по формуле

$$V_{\text{ско}_{\text{связи}}} = \frac{\text{ско}_{\text{связи, km}}}{\text{med}_{km}} \quad (2)$$

где med_{km} – медиана рассматриваемого показателя для k -го и m -го биотопов, а $\text{ско}_{\text{связи, km}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i^k - y_i^m)^2}{n}}$ характеризует усредненный квадрат разности между данными показателя k -го и m -го биотопов (y_i^k, y_i^m) – i -е значения данных k -го и m -го биотопов соответственно, n – объем данных (Максимова, Кухта, 2022). Таким образом, данный коэффициент характеризует близость рассматриваемых показателей во времени, дополняя проведенный анализ всего массива без учета временной компоненты.

4. Расчет скользящих коэффициентов корреляции Пирсона в каждый момент времени проводился с шириной окна $W = 11$ и приписывался к срединному году (Шишов, 2015). Соответственно, значения скользящих коэффициентов вычислялись только для «полных» окон. Полученные значения коэффициентов изменяются в пределах от 0 до 1, при этом близость к 0 говорит о несогласованности в поведении временных рядов, а близость к 1, наоборот, сигнализирует о синхронности динамики анализируемых временных рядов. Таким образом, скользящие коэффициенты корреляции помогут ответить на вопрос, является ли временная согласованность между индексами приростов от биотопа к биотопу случайной, или, наоборот, нет.

Для реализации корреляционного и дисперсионного анализа (Айвазян, Мхитарян, 2001) использовался программный модуль *Statistica 15* и пакет *Excel 2016*.

Результаты и их обсуждение

Анализ изменчивости разброса индексов

Для сравнительной оценки влияния типа биотопа на вариабельность индексов линейных и радиальных приростов сосны данной ООПТ взят период с 1984 по 2002 гг., так как для этого отрезка времени имеются сопоста-

вимые ряды индексов приростов. Графические результаты оценки вариабельности представлены в виде диаграммы *boxplot* (Тьюки, 1981) на рис. 1. Диаграммы показывают различия изменчивости от года к году в каждом биотопе как в интерквартильном разбросе (*IQR*), так и в размахе этих значений (*R*). Интерквартильные размахи задают размеры «коробок», а «усы» отображают разброс не входящих в интерквартильный разброс значений.

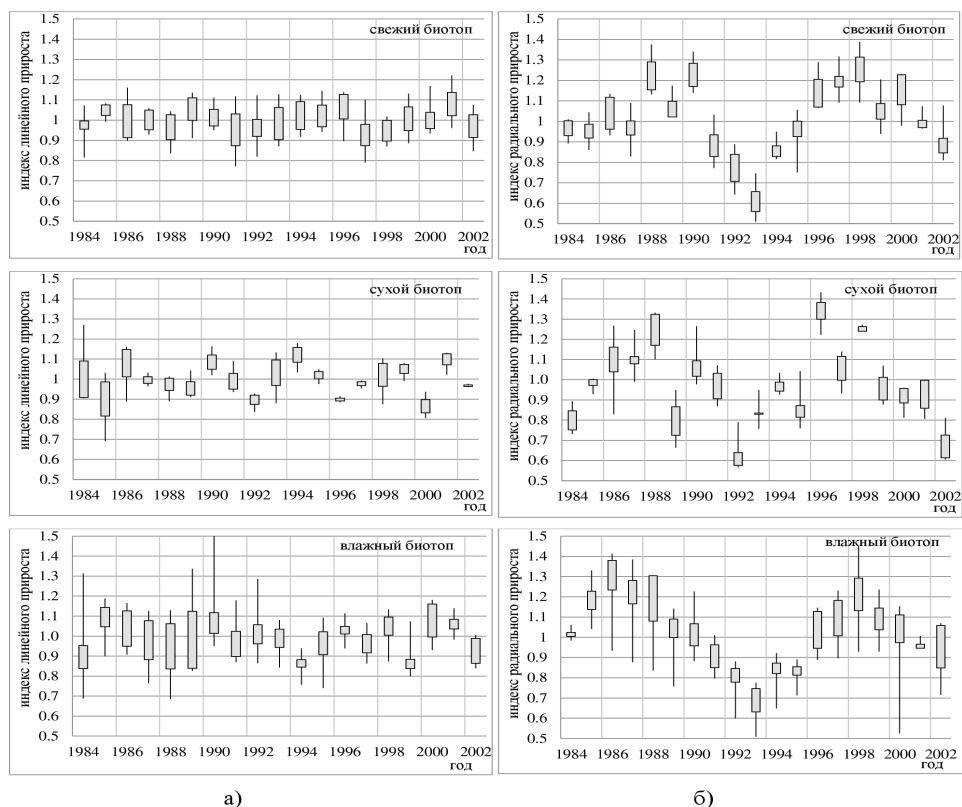


Рисунок 1. Диаграммы *boxplot* (*box-and-whiskers*) в трех типах биотопов заповедника «Кивач» с 1984 по 2002 гг.

для индексов приростов сосны: *а* – линейных, *б* – радиальных

Picture 1. *Box-and-whiskers* plots for linear (*a*) and radial (*b*) pine growth indices in three biotope types of “Kivach” Reserve from 1984 to 2002
or pine growth indices: *a* – linear, *b* – radial

Диаграммы на рис. 1 для индексов линейных приростов демонстрируют меньшую межгодовую изменчивость по сравнению с индексами радиальных приростов. Большая изменчивость радиальных приростов по сравнению с линейными была обнаружена и в наших предыдущих исследованиях (Максимова, Кухта, 2022). Это явление, по нашему мнению, объясняется более сильными воздействиями факторов внешней среды на апикальные почки, междоузлия, чем на камбий, отделённый от внешней среды лубом и корой. Другими словами, совокупность органов дерева, формирующего рост его в высоту, подвергается более жесткому отбору, чем меристема ствола (Максимова, Кухта, 2022; Chernogaeva, Kuhta, 2018; Chernogaeva et al., 2020).

Также рис. 1 визуализирует меньшую внутригодовую изменчивость приростов в свежих и сухих биотопах по сравнению со влажными как для радиальных, так и для линейных приростов. При этом в сухих биотопах наблюдается самый низкий уровень вариабельности, особенно для линейных приростов. Это, вероятно, объясняется тем, что в условиях произрастания, характерных для данной ООПТ, влажные биотопы представляют собой зону экологического оптимума для сосны, а сухие местообитания – зону пессимума, для которой характерно жесткое лимитирование по количеству влаги в субстрате. Как показано в наших ранее опубликованных работах (Максимова, Кухта, 2022; Кухта, Попова, 2020; Chernogaeva, Kuhta, 2018), давление отбора ниже в популяциях сосны, не испытывающих дефицит необходимых ресурсов.

Межгодовая изменчивость индексов радиальных приростов визуально больше, но от биотопа к биотопу различия IQR выражены меньше, чем у линейных (рис. 1б).

Сравнение рядов показателей IQR в разных типах биотопов по всему массиву данных за заданный временной промежуток с помощью непараметрического H -критерия (1) показывает:

– статистически значимые отличия IQR для индексов линейных приростов от биотопа к биотопу (величина $p_{value} = 0.02 < \alpha$, при этом в сухом биотопе IQR значимо меньше;

– статистически незначимые отличия IQR для индексов радиальных приростов (величина $p_{value} = 0.31 > \alpha$).

Для индексов радиальных приростов получены статистически незначимые отличия IQR по всему массиву данных. Но поскольку это не отображает близость во времени, то требуется дальнейший анализ синхронности в разных биотопах с применением скользящих коэффициентов корреляции и анализа показателя близости динамики $V_{ско_связи}$ (2). Рассчитанные $V_{ско_связи}$ для IQR индексов приростов за период 1984-2002 гг. в зависимости от типа биотопа демонстрируют расхождения от вида индекса: линейного или радиального (табл. 1). Для индексов радиальных приростов этот показатель примерно в 1.5 раза ниже, чем для линейных, что говорит о том, что различия в вариабельности индексов линейных приростов выше от биотопа к биотопу.

Таблица 1. Показатели попарной близости динамических рядов для IQR индексов линейных и радиальных приростов за период 1984-2022 гг.

Table 1. Pairwise proximity indicators of VSD dynamic series for the IQR variability values of linear and radial increments indices for the period 1984-2022

Сравниваемые биотопы	Прирост	
	линейный	радиальный
свежий-сухой	0.98	0.70
свежий-влажный	0.66	0.52
сухой-влажный	1.01	0.66

Проведённая ранее для сосняков заказника «Полярный круг» сходная процедура показала, что аналогичные оценки попарной близости рядов как радиальных, так и линейных приростов по каждой паре ниже, чем для популяций заповедника «Кивач» (Максимова, Кухта, 2022). Объясняется это, очевидно, географической близостью заказника «Полярный круг» к северной границе ареала сосны. В условиях лимитирования основных необходимых ресурсов вариабельность ходов роста деревьев снижается вследствие воздействия интенсивного естественного отбора. Древостои заповедника «Кивач» произрастают в гораздо более комфортных условиях, что способствует реализации большего количества вариантов развития организмов.

Таким образом, для индексов линейных приростов уже зафиксированы статистически значимые различия в вариабельности, что сигнализирует о необходимости проведения анализа индексов линейных приростов в зависимости от типа биотопа произрастания сосны.

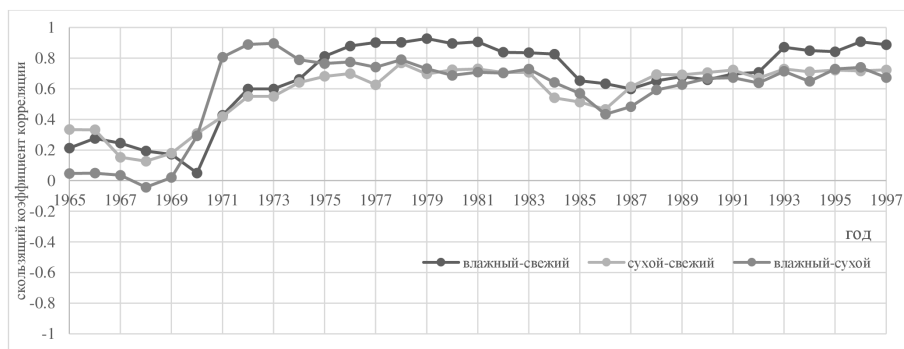
Анализ изменчивости медиан индексов

Далее проанализируем близость и ход медианных значений. При статистической близости вариабельности и ее динамики становится целесообразной и возможной проверка равенства медиан индексов для радиальных приростов всего имеющегося массива данных с 1960 г. по 2002 г. Исследование равенства медианных значений индексов радиальных приростов (в условиях статистической незначимости различий вариабельности) по H -критерию (1) показала незначимые отличия: расчетная статистика критерия имеет значение $p_{\text{value}} = 0.84 > \alpha$.

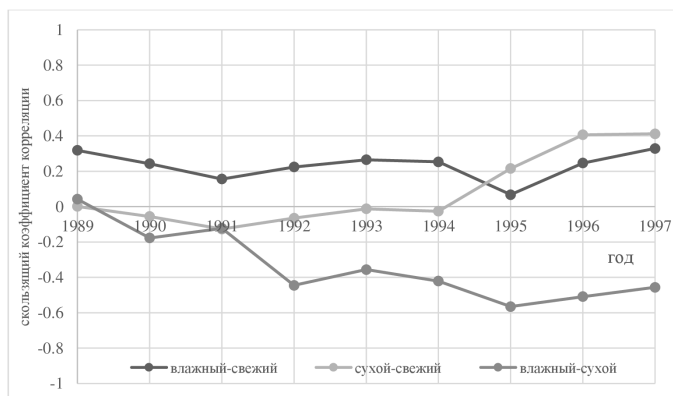
На рис. 2 представлен ход скользящих коэффициентов корреляции для различных пар биотопов с окном скольжения $W = 11$ для индексов радиальных приростов (за весь период наблюдений с 1960 г. по 2002 г.) и для индексов линейных приростов (за весь период наблюдений с 1984 г. по 2002 г.). Нижний порог, когда коэффициенты корреляции становятся положительно значимыми, $r = 0.53$. На рис. 2а видно, что практически на протяжении всего исследуемого периода между индексами радиальных приростов по биотопам наблюдается значимая синхронность, в то время как для линейных (рис. 2б) – связи незначимы и порой наблюдается даже асинхронность (между индексами линейных приростов в сухих и влажных биотопах). Отметим, что на начальных этапах роста для медианных индексов радиальных приростов связь от биотопа к биотопу также слабая, поскольку на начальных стадиях развития древостоя индивидуальная изменчивость выше, но вследствие постоянного прессинга отбора она довольно быстро снижается (Дыренков, 1984).

Далее рассчитаем для медиан индексов радиальных приростов показатели покомпонентной близости рядов по каждой паре биотопов (табл. 2). Рассчитанный по формуле (2) коэффициент для медиан дополняет проведенный анализ синхронности с помощью скользящих коэффициентов корреляции. Полученные значения этого показателя малы даже в сравнении с теми же, но рассчитанными для IQR (см. табл. 1). Более того, полученные значения этого показателя между парами биотопов близки между собой и практически совпа-

дают с аналогичными показателями, рассчитанными для государственного природного заказника регионального значения «Полярный круг» (Максимова, Кухта, 2022). Этот факт выявляет покомпонентную близость медиан индексов радиальных приростов в разных биотопах заповедника «Кивач».



а)



б)

Рисунок 2. Скользящие корреляции Пирсона для медиан а) радиальных б) линейных приростов с шириной окна скольжения $W = 11$

Picture 2. Pearson's sliding correlations for medians of а) radial б) linear growth indices with a sliding window width $W = 11$

Для медиан индексов линейных приростов такой расчет не целесообразен, так как скользящие корреляции показывают, что поведение медианных значений по синхронности различно в зависимости от типа биотопа.

Полученные результаты дают возможность судить о попарной близости показателей IQR и медиан в динамике для индексов радиальных приростов при переходе от биотопа к биотопу и расхождении IQR и медиан в динамике для индексов линейных приростов. Таким образом, характер изменчивости у радиальных приростов (и, следовательно, их отклик на воздействие факторов среды) можно признать более сходным в разных типах биотопов, чем у линейных.

Таблица 2. Показатели попарной близости динамических рядов для медиан индексов радиальных приростов за весь период наблюдений

Table 2. Indicators of pairwise proximity of dynamic series VSD dynamic series for medians of radial growth indices for the entire observation period

Сравниваемые биотопы	$V_{\text{СКО}_{\text{СВЯЗИ}}}$
свежий-сухой	0.14
свежий-влажный	0.12
сухой-влажный	0.15

Проведенное исследование продемонстрировало статистическую схожесть индексов радиальных приростов по отношению к типу биотопа, в отличие от линейных приростов. Полученный результат согласуется с результатом, полученным при анализе динамики изменчивости междуузлий и годовых колец сосняков заказника «Полярный круг». Кроме того, подтвердился факт большей изменчивости во времени индексов радиальных приростов по отношению к линейным (Максимова, Кухта, 2022).

Заключение

В результате апробации ранее разработанного нами подхода к оценке близости динамических рядов индексов линейных и радиальных приростов в различных биотопах получены результаты, сходные с результатами для древостоев сосны обыкновенной *P. sylvestris* государственного природного заказника «Полярный круг».

Вариабельность размеров годовых колец существенно выше вариабельности длин междуузлий. Однако динамика изменчивости радиальных приростов, в отличие от линейных, зависит от характера биотопа лишь на ранних этапах роста и по мере развития древостоев теряет статистическую значимость.

Полученные результаты подтверждают информативность рядов линейных приростов для мониторинга лесных экосистем на коротких (до 30 лет) периодах времени, а также предпочтительность использования показателей радиальных приростов при ретроспективном анализе воздействия на биоценозы климатов прошлого. Кроме того, при ретроспективной оценке откликов исследованных древостоев на воздействие климатических факторов можно отказаться от классификации биотопов. В то же время мониторинг бореальных сосняков методом анализа линейных приростов следует осуществлять с учетом характера местообитания.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках тем НИОКТР АААА-А20-120013190049-4 «Развитие методов и технологий мониторинга загрязнения

природной среды вследствие трансграничного переноса загрязняющих веществ (ЕЭК ООН: ЕМЕП, МСП КМ) и кислотных выпадений в Восточной Азии (ЕАНЕТ)»; АААА-А20-120020590066-5 «Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга».

Список литературы

Айвазян, С.А., Мхитарян, В.С. (2001) *Теория вероятностей и прикладная статистика. Прикладная статистика. Основы эконометрики*, М., ЮНИТИ-ДАНА, т.1, 656 с.

Алисов, Б.П. (1956) *Климат СССР*, М., Изд-во Моск. ун-та, 128 с.

База данных «Ценофонд Европейской России». URL: <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/princip.htm> (дата обращения 02.03.2021).

Берг, Л.С. (1922) *Климат и жизнь*, Госиздат, М., 57 с.

Долгова, Е.А., Мацковский, В.В., Соломина, О.Н. (2018) Дендрохронология Соловецких островов, *География, развитие науки и образования*, с. 394-398.

Дыренков, С.А. (1984) *Структура и динамика таежных ельников*, Наука, Ленинградское отделение, 176 стр.

Кузнецова, В.В., Чернокульский, А.В., Козлов, Ф.А., Кухта, А.Е. (2020) Связь линейного и радиального прироста сосны обыкновенной с осадками разного генезиса в лесах Керженского заповедника, *Известия РАН. Серия географ.*, № 1, с. 93-102, doi: 10.31857/S2587556620010124.

Кухта, А.Е. (2009) Влияние температуры и осадков на годичный линейный прирост сосны обыкновенной на берегах Кандалакшского залива, *Лесной вестник. МГУЛ*, № 1 (64), с. 61-67.

Кухта, А.Е., Румянцев, Д.Е. (2010) Линейный и радиальный приросты сосны обыкновенной в Волжско-Камском и Центрально-Лесном государственных природных заповедниках, *Лесной вестник (Forestry bulletin)*, № 3, с. 88-95.

Кухта, А.Е., Попова, Е.Н. (2020) Климатический сигнал в линейном приросте сосны обыкновенной бореальных фитоценозов побережья Белого моря, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. 31, № 3-4, с. 33-45, doi:10.21513/0207-2564-2020-3-33-45.

Максимова, О.В., Кухта, А.Е. (2022) Вариабельность линейных и радиальных приростов сосны обыкновенной побережья Белого моря в зависимости от условий произрастания, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIII, с. 20-36, doi: 10.21513/0207-2564-2022-3-4-20-36.

Раменская, М.Л. (1983) *Анализ флоры Мурманской области и Карелии*, Наука, Ленингр. отд-ние, 215 с.

Сукачѳв, В.Н. (1972) *Избранные труды в трех томах: Основы лесной типологии и биогеоценологии*, под ред. Е.М. Лавренко, Л., Наука, т. 1, 419 с.

Тишков, А.А., Белоновская, Е.А., Кренке, А.Н., Титова, С.В., Царевская, Н.Г. (2021) Изменения биологической продуктивности наземных экосистем Российской Арктики в XXI в., *Арктика, Экология и Экономика*, т. 11, № 1, с. 30-41, doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-30-41.

Тишков, А.А., Кренке-мл. А.Н. (2015) «Позеленение» Арктики в XXI веке как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения, *Арктика, Экология и Экономика*, № 4, с. 28-38.

Тьюки, Дж. (1981) *Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ*, М., Мир, 696 с.

Шишов, В.В. (2015) *Методы анализа дендроклиматических данных и их применение для территории Сибири, учебное пособие*, Под ред. В.В. Шишов, И.И. Тычков, М.И. Попкова. Красноярск, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», 210 с.

Bradley, R.S. (2015) *Paleoclimatology. Reconstructing climates of the Quaternary*, Third edition, UK, Elsevier, p. 667

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

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

Cook, E.R., Holmes, R.L. (1996) Guide for computer program ARSTAN, *The international tree-ring data bank program library version*, vol. 2, no. 0, pp. 75-87.

Dolgova, E., Cherenkova, E., Solomina, O., Matskovsky, V. (2018) Influence of the large-scale atmospheric circulation variations on spruce tree-ring growth from Solovki Islands (Russia), *Practical Geography and XXI Century Challenges*, pp. 78.

Dolgova, E.A., Solomina, O.N., Matskovsky, V.V., Dobryansky, A.S., Semenyak, N.A., Shpunt, S.S. (2019) Spatial Variation of Pine Tree-Ring Growth in the Solovetsky Islands, *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, pp. 41-50, <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019241-50>.

Holmes, R.L. (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement, *Tree-Ring Bulletin*, vol. 43, pp. 69-78.

Grissino-Mayer, H.D. (2001) *Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECOA*, pp. 205-221.

Jansons, A., Matisons, R., Baumanis, I., Puriņa, L. (2013). Effect of climatic factors on height increment of Scots pine in experimental plantation in Kalsnava,

Latvia, *Forest Ecology and Management*, 306, 185-191. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.06.039.

Kruskal, W.H., Wallis, W.A. (1952) Use of ranks in one-criterion variance analysis, *Journal of the American Statistical Association*, 47, no. 260, pp. 583-621.

Matskovsky, V., Kuznetsova, V., Morozova, P., Semenyak, N., Solomina, O. (2020) 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*, vol. 611, pp. 1-8, DOI: 10.1088/1755-1315/611/1/012047.

Misi, D., Puchałka, R., Pearson, C., Robertson, I., Koprowski, M. (2019). Differences in the Climate-Growth Relationship of Scots Pine. A Case Study from Poland and Hungary, *Forests*, 243(10), 1-12, DOI: 10.3390/f10030243.

Rinn, F., Jäkel, S. (1996) *TSAP reference manual*, Frank Rinn, Heidelberg, Germany, pp. 262.

References

Ajvazyan, S.A., Mhitaryan, V.S. (2001) *Teoriya veroyatnostej i prikladnaya statistika. Prikladnaya statistika. Osnovy ekonometriki* [Probability theory and applied statistics. Applied statistics. Fundamentals of Econometrics], Moscow, Russia, vol. 1, 656 p.

Alisov, B.P. (1956) *Klimat SSSR* [Climate of the USSR], Moscow, Russia, 128 p.

Baza dannyh «Cenofond Evropejskoj Rossii» [The database "Cenofond of European Russia"], URL: <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/princip.htm> (data obrashcheniya 02.03.2021). [accessed 02.03.2021].

Berg, L.S. (1922) *Klimat i zhizn'* [Climate and life], Gosizdat, Moscow, Russia, 57 p.

Dolgova, E.A., Mackovskij, V.V., Solomina, O.N. (2018) Dendrochronologiya Soloveckih ostrovov [Dendrochronology of the Solovetsky Islands], *Geografiya, razvitie nauki i obrazovaniya*, pp. 394-398.

Dolgova, E.A., Solomina, O.N., Mackovskij, V.V., Dobryanskij, A.S., Semenyak, N.A., Shpunt, S.S. (2019) Prostranstvennaya izmenchivost' prirosta sosny na Soloveckih ostrovah [Spatial variability of pine growth on the Solovetsky Islands], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, no. 2, p. 41-50.

Dyrenkov, S.A. (1984) Struktura i dinamika tayezhnykh yel'nikov [Structure and dynamics of taiga spruce forests], *Nauka, Leningradskoye otdeleniye*, 176 pp.

Kuznecova, V.V., Chernokul'skij, A.V., Kozlov, F.A., Kuhta, A.E. (2020) Svyaz' linejnogo i radial'nogo prirosta sosny obyknovennoj s osadkami raznogo genezisa v lesah Kerzhenskogo zapovednika [The relationship of linear and radial

growth of scots pine with precipitation of different genesis in the forests of the Kerzhensky Reserve], *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, no. 1, pp. 93-102.

Kuhta, A.E. (2009) Vliyanie temperatury i osadkov na godichnyj linejnyj prirost sosny obyknovnoy na beregah Kandalakshskogo zaliva [The influence of temperature and precipitation on the annual linear growth of scots pine on the shores of the Kandalaksha Bay], *Lesnoj vestnik*, no. 1(64), pp. 61-67.

Kuhta, A.E., Rummyancev, D.E. (2010) Linejnyj i radial'nyj prirosty sosny obyknovnoy v Volzhsko-Kamskom i Central'no-Lesnom gosudarstvennyh prirodnyh zapovednikah [Linear and radial growth of scots pine in the Volga-Kama and Central Forest State Nature Reserves], *Lesnoj vestnik*, no. 3, pp. 88-95.

Kuhta, A.E., Popova, E.N. (2020) Klimaticheskij signal v linejnom priroste sosny obyknovnoy boreal'nyh fitocenzov poberezh'ya Belogo moray [Climate signal in linear growth of scots pine of boreal phytocenoses of the White Sea coasts], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. 31, no. 3-4, pp. 33-45, doi:10.21513/0207-2564-2020-3-33-45.

Maksimova, O.V., Kuhta, A.E. (2022) Variabel'nost' lineynykh i radial'nykh prirostov sosny obyknovnoy poberezh'ya Belogo morya v zavisimosti ot usloviy proizrastaniya [Variability of linear and radial increments of Scots pine of the White Sea coast depending on growing conditions], *Ekologicheskij monitoring i modelirovaniye ekosistem*, T. XXXIII, pp. 20-36, doi: 10.21513/0207-2564-2022-3-4-20-36.

Ramenskaya, M.L. (1983) *Analiz flory Murmanskoy oblasti i Karelii* [Analysis of the flora of the Murmansk region and Karelia], Leningrad, Russia, 215 p.

Sukachyov, V.N. (1972) *Izbrannye trudy v trekh tomah: Osnovy lesnoj tipologii i biogeocenologii, pod red. E.M. Lavrenko* [Selected works in three volumes: Fundamentals of Forest Typology and Biogeocenology], edited by E. M. Lavrenko, Leningrad, Russia, vol. 1, 419 p.

Tishkov, A.A., Belonovskaya, E.A., Krenke, A.N., Titova, S.V., Carevskaya, N.G. (2021) Izmeneniya biologicheskoy produktivnosti nazemnyh ekosistem Rossijskoj Arktiki v XXI [Changes in biological productivity of terrestrial ecosystems of the Russian Arctic in the XXI], *Arktika. Ekologiya i Ekonomika*, vol. 11, no. 1, pp. 30-41, doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-30-41.

Tishkov, A.A., Krenke-m, A.N. (2015) «Pozelenenie» Arktiki v HHI veke kak effekt sinergizma dejstviya global'nogo potepeniya i hozyajstvennogo osvoeniya ["Greening" of the Arctic in the XXI century as a synergistic effect of global warming and economic development], *Arktika. ekologiya i ekonomika*, no. 4, pp. 28-38.

T'yuki, Dzh. (1981) *Analiz rezul'tatov nablyudenij. Razvedochnyj analiz* [Analysis of the results of observations. Exploratory analysis], Moscow, Russia, 696 p.

Shishov, V.V. (2015) *Metody analiza dendroklimaticheskikh dannykh i ikh primeneniye dlya territorii Sibiri: uchebnoye posobiye* [Methods for the analysis of dendroclimatic data and their application for the territory of Siberia. textbook], In V.V. Shishov, I.I. Tychkov, M.I. Popkova (eds). Krasnoyarsk, Russia, 210 p.

Bradley, R.S. (2015) *Paleoclimatology. Reconstructing climates of the Quaternary*, Third edition, UK, Elsevier, p. 667.

Chernogaeva, G.M., Kuhta, A.E. (2018) The Response of Boreal Forest Stands to Recent Climate Change in the North of the European Part of Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, Allerton Press Inc. (United States), vol. 43, no. 6, pp. 418-424, doi:10.3103/S1068373918060109.

Chernogaeva, G.M., Kuznetsova, V.V., Kukhta, A.E. (2020) Precipitation Effects on the Growth of Boreal Forest Stands in the Volga Region, *Russian Meteorology and Hydrology*, Allerton Press Inc. (United States), vol. 45, no. 12, pp. 851-857, doi: 10.3103/S1068373920120055.

Cook, E.R., Holmes, R.L. (1996) Guide for computer program ARSTAN, *The international tree-ring data bank program library version*, vol. 2, no. 0, pp. 75- 87.

Dolgova, E., Cherenkova, E., Solomina, O., Matskovsky, V. (2018) Influence of the large-scale atmospheric circulation variations on spruce tree-ring growth from Solovki Islands (Russia), *Practical Geography and XXI Century Challenges*, pp. 78-78.

Dolgova, E.A., Solomina, O.N., Matskovsky, V.V., Dobryansky, A.S., Semenyak, N.A., Shpunt, S.S. (2019) Spatial Variation of Pine Tree-Ring Growth in the Solovetsky Islands, *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, pp. 41-50, (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019241-50>.

Holmes, R.L. (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement, *Tree-Ring Bulletin*, vol. 43, pp. 69-78.

Grissino-Mayer, H.D. (2001) *Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA*, pp. 205-221.

Jansons, A., Matisons, R., Baumanis, I., Puriņa, L. (2013). Effect of climatic factors on height increment of Scots pine in experimental plantation in Kalsnava, Latvia, *Forest Ecology and Management*, 306, 185-191, DOI: 10.1016/j.foreco.2013.06.039.

Kruskal, W.H., Wallis, W.A. (1952) Use of ranks in one-criterion variance analysis, *Journal of the American Statistical Association*, 47, no. 260, pp. 583-621.

Matskovsky, V., Kuznetsova, V., Morozova, P., Semenyak, N., Solomina, O. (2020) 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*, vol. 611, pp. 1-8, DOI: 10.1088/1755-1315/611/1/012047.

Misi, D., Puchałka, R., Pearson, C., Robertson, I., Koprowski, M. (2019). Differences in the Climate-Growth Relationship of Scots Pine: A Case Study from Poland and Hungary, *Forests*, 243(10), 1-12, DOI: 10.3390/f10030243.

Rinn, F., Jäkel, S. (1996) *TSAP reference manual*, Frank, Rinn, Heidelberg, Germany, p. 262.

Статья поступила в редакцию (Received): 01.08.2023;
Доработана после рецензирования (Revised): 06.09.2023.

Для цитирования / For citation

Максимова, О.В., Кухта, А.Е (2023) Сравнительный анализ изменчивости линейных и радиальных приростов сосны обыкновенной в разных типах местообитаний государственного природного заповедника «Кивач», *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIV, № 3-4, с. 45-61, doi:10.21513/0207-2564-2023-3-4-45-61.

Maksimova, O.V., Koukhtha, A.E (2023) Comparative analysis of Scots pine lineal and radial increments variability in different types of habitats of the "Kivach" state nature reserve, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXIV, no 3-4, pp. 45-61, doi:10.21513/0207-2564-2023-3-4-45-61.