

Вариабельность линейных и радиальных приростов сосны обыкновенной побережья Белого моря в зависимости от условий произрастания*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⁾ НИТУ «МИСиС»,
Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, 4

*Адрес для переписки: o-maximova@yandex.ru

Реферат. Проведен анализ вариабельности индексированных приростов сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. побережья Кандалакшского залива Белого моря в различных типах местообитаний. Цель данной работы – оценка воздействия условий произрастания сосны обыкновенной на статистические характеристики рядов ее линейных и радиальных приростов. Разработан способ оценки близости (степени синхронности) динамических рядов индексов линейных и радиальных приростов с помощью сформированного показателя на основе коэффициента вариации. Были использованы стандартные методы измерений и анализа дендрохронологических архивов, а также статистические инструменты вариабельности и методы корреляционного анализа. Обнаружено сходство отклика радиальных приростов и несходство отклика линейных приростов на воздействие климатических факторов в сухих, влажных и свежих биотопах. Выявлена статистическая независимость параметров изменчивости радиальных приростов от характера местообитания. Сделан вывод, 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, биотопы, вариабельность.

Linear and radial growth variability of scots pine depending on growing conditions on the White Sea coast*O.V. Maksimova^{1), 2)*}, A.E. Koukhta¹⁾*

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

²⁾Moscow Institute of Steel and Alloys,
4, Leninsky pr., Moscow, 119049, Russian Federation

*Correspondence address: *o-maximova@yandex.ru*

Abstract. The analysis of the Scots pine *Pinus sylvestris* L. indexed increments variability on the coast of the Kandalaksha Bay of the White Sea, in various types of habitats, has been carried out. The purpose of this work is to assess the impact of the growing conditions of the Scots pine on the statistical characteristics of the series of its linear and radial increments. An indicator was proposed for studying the conjugation of growth indices time series. Standard methods for measuring and analyzing dendrochronological archives were used, as well as statistical instruments of variability and methods of correlation analysis. The similarity of the response of radial increments and the dissimilarity of the response of linear increments to the influence of climatic factors in dry, wet and fresh biotopes were found. The statistical independence of the radial increments variability parameters from the habitat nature was revealed. It is concluded that the choice of methods of analysis based on linear or radial increments is determined by the objectives of the planned research – monitoring forest ecosystems in modern conditions of climate change or long-term paleoclimatic analysis.

Keywords. Scots pine, linear growth, radial growth, biotopes, variability.

Введение

В последние десятилетия особую актуальность приобретают исследования климатогенных преобразований биомов тундры, лесотундры и тайги. Отклик лесных экосистем на воздействие климатических факторов определяют по характеру изменчивости параметров хода роста деревьев, в частности, радиальных (древесных колец) и линейных (междоузлий) приростов (Кузнецова и др., 2020; Кухта, Попова, 2020; Matskovsky et al., 2020; Пчелкин 2021; Тишков и др., 2021; Тишков, Кренке, 2015; Chernogaeva, Kuhta, 2018; Chernogaeva et al., 2020).

Для оценок взаимодействий климатических факторов и лесных экосистем на длительных периодах (в течение столетий) времени широко применяется метод дендрохронологии с использованием годичных кольцевых (радиальных) приростов деревьев. Указанный метод употребляется при построении палеоклиматических реконструкций и при исследованиях состояния экосистем прошлого, поскольку делает возможным ретроспективный анализ откликов древостоев на воздействия температур, осадков и иных факторов внешней среды отдаленного прошлого (Кузнецова и др., 2020; Соломина и др., 2020; Dolgova et al., 2018; Dolgova et al., 2019; Kruskal, Wallis, 1952).

Размеры междоузлий зависят от качества апикальных почек, подверженных прессингу факторов внешней среды. Вследствие этого ряды линейных приростов формируют более очевидные, чем кольцевые хронологии, климатические сигналы и обнаруживают большую чувствительность к воздействию факторов среды обитания. Ограничением данного метода являются короткие

(до 30 лет) периоды измерений (Кухта, Попова, 2020; Chernogaeva, Kuhta, 2018; Chernogaeva et al., 2020).

Оба метода – с использованием и радиальных, и линейных приростов – применимы для изучения как регионального, так и локального климатического сигнала на разных временных интервалах (Chernogaeva, Kuhta, 2018; Chernogaeva et al., 2020). Однако методология оценки состояния древостоев с использованием линейных и кольцевых хронологий требует развития и уточнения сфер применения рассматриваемых инструментов.

Цель данной работы – оценка воздействия условий произрастания сосны обыкновенной на статистические характеристики рядов ее линейных и радиальных приростов.

Для решения данной проблемы поставлена задача сформировать и апробировать способ оценки близости (степени синхронности) динамических рядов индексов линейных и радиальных приростов.

Методы и материалы

Измерения линейных и радиальных приростов сосны обыкновенной проводились на территории государственного комплексного (ландшафтного) заказника регионального значения «Полярный круг», расположенного в Республике Карелия, на побережье Кандалакшского залива Белого моря (66°32' N, 33°11' E).

Исследуемая территория находится в Кольско-Печорской подпровинции Евроазиатской таежной области, в Северо-европейской 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).

Мурманская область, согласно климатическому районированию по Б.П. Алисову, находится в Атлантико-Арктической климатической области умеренного пояса, в зоне избыточного увлажнения (Алисов, 1956). Средообразующими факторами в бореальных биогеоценозах, как указывает Л.С. Берг, являются гумидный климат, а также микро- и мезорельеф местности (Берг, 1922). Для данного биома характерен высокий уровень разнообразия условий произрастания, обусловленный мозаичностью и многообразием местообитаний.

Согласно классической типологии В.Н. Сукачева, исследования проводились в трех основных типах местообитаний (биотопов) (Сукачев, 1972). Сосняки сфагновые (*Pineta sylvestris fruticuloso-sphagnosa*) представляют собой влажные биотопы (местообитания). Сосняки (*Pineta fruticuloso-hylocomiosa*) с примесью ели европейской (*P. abies* (L.) H. Karst.), березы повислой (*Betula pendula* Roth), рябины обыкновенной *Sorbus aucuparia* Kom. ex Gatsch. являются свежими биотопами. Сосняки лишайниковые (*Pineta sylvestris cladinos*) на т.н. «китовых лбах» – выходах скальных пород – представляют собой сухие биотопы (База данных «Ценофонд...», 2021; Сукачев, 1972).

Анализ отклика древостоев сосны обыкновенной на воздействие температур и осадков проводился на материале результатов измерений линейных и

радиальных приростов (т.е. годовых приростов междуузлий и колец) сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., 1753 (класс *Pinopsida*, порядок *Pinales*, семейство *Pinaceae*) (Плантариум..., 2020).

Согласно методике, представленной в (Кухта, Попова, 2020; Chernogaeva, Kuhta, 2018), в 2007 г. были измерены линейные приросты подраста, молодняка и приспевающих деревьев на пробных площадях (ПП), каждая радиусом по 10 м, в свежих (7 ПП), сухих (8 ПП) и влажных (4 ПП) местообитаниях (всего 19 пробных площадей). Пробные площади были заложены маршрутным методом; на каждой из них случайным образом отбиралось и измерялось по 5 деревьев, высота которых варьировала от 1.63 до 2.22 м. У каждого дерева определялись размеры междуузлия стволика/ствола, начиная с верхнего и до последнего четко различимого над корневой шейкой. В результате этих операций был получен архив за период 1980-2007 гг.

Для оценки параметров радиальных приростов использованы взятые из живых деревьев дендрохронологические образцы сосны обыкновенной (*P. sylvestris*). Образцы отбирались у спелых деревьев, произрастающих на тех же выбранных пробных площадях. Возраст деревьев составлял 219-54 года, высота – 7-12 м. Керны взяты у 15 деревьев в свежих местообитаниях, 15 – в сухих местообитаниях, 12 – во влажных местообитаниях. Радиальный прирост древесины определялся как ширина годовых колец. Измерения осуществлялись на установке LINTAB (версия 3.0, программное обеспечение TSAP) (Rinn, Jäkel, 1996). Контроль качества образцов был выполнен с помощью программы COFECNA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Для всех образцов применялось 100-летнее линейное сглаживание (Bradley, 2015). С помощью данного фильтра был удален неклиматический сигнал из ряда дендрохронологических данных (ежегодного прироста годовых колец).

Для удаления возрастной компоненты ряды радиальных и линейных приростов индексировались: в дендрохронологических сериях возрастной тренд удален с помощью программы ARSTAN (Bradley, 2015; Cook, Holmes, 1996). Для этого значение линейного прироста за каждый год было поделено на значение точечной аппроксимирующей функции за этот год. В результате такой процедуры были получены динамические ряды индексов приростов. Это позволило проводить сравнения откликов рядов приростов деревьев разного возраста на воздействие климатических факторов (Кухта, 2009; Кухта, Румянцев, 2010; Chernogaeva, Kuhta, 2018; Chernogaeva et al., 2020).

Для первичного анализа варибельности индексов линейных и радиальных приростов в работе используется диаграмма «box-and-whiskers» («ящик с усами»). Диаграмма «box-and-whiskers» была разработана американским математиком, профессором университета Принстона, Джоном Тьюки в 1970-х годах (Тьюки, 1981). Эта диаграмма позволяет быстро сравнивать выборки разных объемов не только по медианным значениям, но и оценивать варибельность каждой группы по размерам ящиков. Размеры «ящиков» диаграммы определяются межквартильным размахом, а по размеру усов и их границам, описываемым наибольшим и наименьшим значениями выборки в

данном исследовании, оцениваются крайние статистически значимые значения для выборки и ее асимметрия.

Для статистической оценки влияния типа биотопа произрастания сосны на вариабельность и медианные значения ее линейных и радиальных приростов использовался непараметрический критерий Краскела-Уоллиса (H -критерий), который служит альтернативой одномерному дисперсионному анализу (Kruskal, Wallis, 1952). Таким образом, этот критерий свободен от типа распределения данных, что при небольших объемах выборок, как в нашем случае, освобождает исследователя от возможных ошибок предположения нормальности данных. Критерий основывается на проверке равенства медиан нескольких групп; проверяется гипотеза, что данные имеют одинаковое распределение, 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, а R_i – сумма рангов наблюдений в группе i .

Для сравнения показателей индексов приростов рассматривались медианы, так как они устойчивы к экстремальным значениям (выбросам) и тем самым дают более полное представление о «типичном» значении приростов междуузлий и годовых колец, чем простое среднее. Для оценки связи между медианами индексов линейных приростов (междуузлий) сосны различных мест произрастаний использовались коэффициенты корреляции Пирсона (r) с оценкой значимости по критерию Стьюдента на уровне $50.0 = \alpha$. Для реализации корреляционно-регрессионного анализа временных рядов и статистического оценивания (Айвазян, Мхитарян, 2001) использовался программный модуль *Statistica 15* и пакет *Excel 2016*.

Результаты и их обсуждение

Как показывают результаты проведенных нами ранее исследований, изменчивость приростов, как показатель отклика древостоев на воздействие внешних факторов, зависит от типа местообитания (Кухта, 2009; Кухта, Румянцев, 2010; Chernogaeva, Kuhta, 2018; Chernogaeva et al., 2020). В данной работе индексы линейных и радиальных приростов определялись для трех типов биотопов: свежих, влажных и сухих (Сукачев, 1972). Для оценки влияния типа биотопа на параметры линейных и радиальных приростов сосны взят период с 1984 по 2005 гг., так как для этого периода имеются сопоставимые ряды индексов приростов. Визуализация вариабельности представлена в виде диаграммы *box-and-whiskers* (Тьюки, 1981) на рис. 1, отображающая различия изменчивости от года к году в каждом биотопе как в интерквартильном разбросе (IQR), так и в размахе этих значений (R). Межквартильные размахи задают размеры «ящиков», а «усы» демонстрируют разброс не входящих в межквартильный разброс значений.

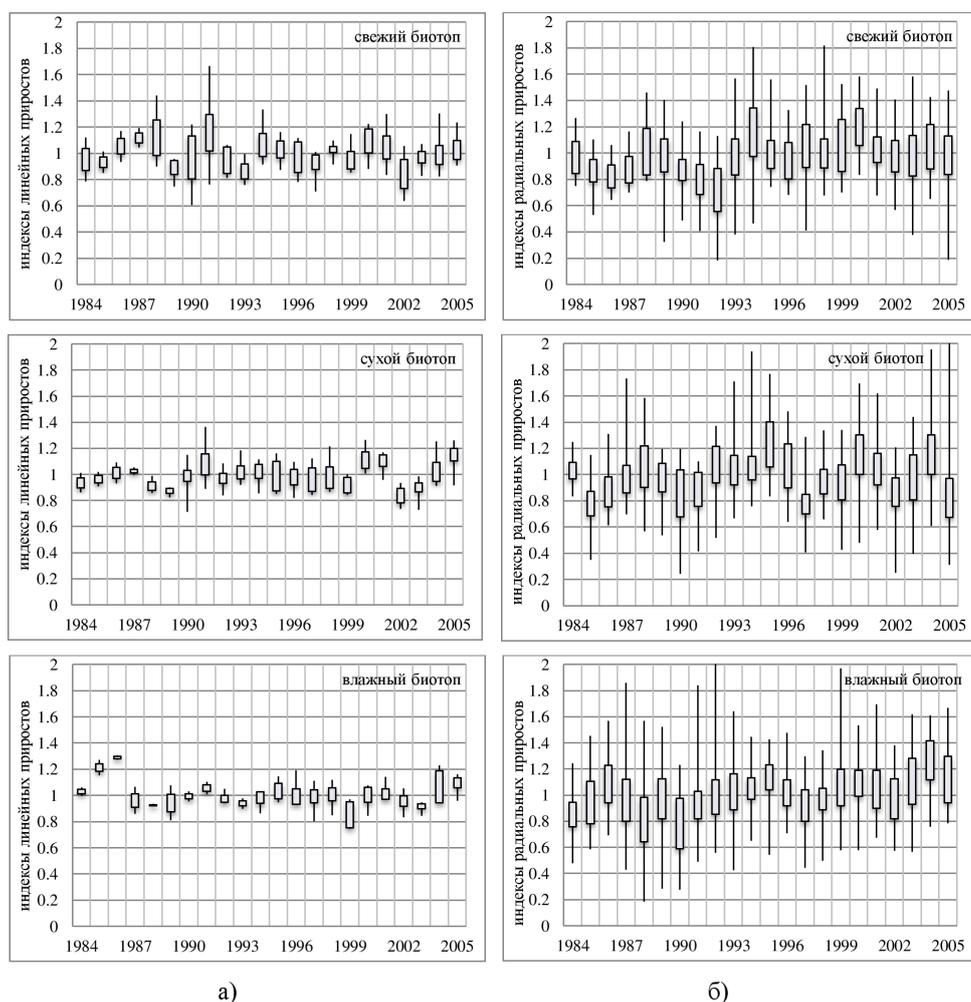


Рисунок 1. Диаграммы *box-and-whiskers* в трех типах биотопов заказника «Полярный круг» (1984-2005 гг.) для индексов приростов сосны: а – линейных, б – радиальных

Figure 1. Box-and-whiskers plots for linear (a) and radial (b) pine growth indices in three biotope types of “Polyarny Krug” Reserve from 1984 to 2005

Диаграммы на рис. 1а для индексов линейных приростов демонстрируют меньшую межгодовую изменчивость во влажных и сухих биотопах по сравнению со свежими. 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 Шелфорда¹⁾ – отмечено жесткое лимити-

¹⁾ Закон толерантности Шелфорда гласит, что отсутствие или невозможность процветания определяется недостатком (в качественном или количественном смысле) или, наоборот, избытком любого из ряда факторов, уровень которых может оказаться близким к пределам переносимого данным организмом. Эти два предела называют пределами толерантности (Гальперин, М.В. Экологические основы природопользования: Учебник. 2-е изд., испр. – М.: ФОРУМ: ИНФРА – М, 2005. – 256 с.).

рование по ряду ресурсов, в том числе по количеству влаги в субстрате. Следовательно, как показано в наших ранее опубликованных работах (Кухта, Попова, 2020; Chernogaeva, Kuhta, 2018), давление отбора в свежих биотопах ниже, чем в сухих и влажных.

В свою очередь, межгодовая изменчивость индексов радиальных приростов визуально больше, но от биотопа к биотопу различия IQR явно не выражены (рис. 1б).

Статистическое сравнение рядов показателей IQR в разных типах биотопов за заданный временной промежуток с помощью непараметрического H -критерия дало следующие результаты:

– значимые отличия IQR для индексов линейных приростов от биотопа к биотопу (величина $p_{value} = 0.008$ меньше уровня значимости α), при этом в свежих биотопах IQR значимо больше;

– незначимые отличия IQR для индексов радиальных приростов (величина $p_{value} = 0.82$ больше уровня значимости α)

Из полученного вывода для индексов линейных приростов следует нецелесообразность сравнения их средних/медианных значений. Таким образом, на начальном этапе характеристики различных типов биотопов можно признать разными с точки зрения воздействия на линейные приросты при уровне значимости α . Для индексов радиальных приростов получены статистически незначимые отличия по всему массиву данных, но для сравнения динамики требуется дополнительное исследование. 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. Параметры изменчивости линейных приростов не дают статистического подтверждения сходства от биотопа к биотопу, параметры вариабельности IQR значимо различаются во влажных, сухих и свежих местообитаниях.

Отметим, что числовые характеристики, рассчитанные по всему массиву данных, не выражают сравнение порядка следования «рисунков» вариабельности. Часто используемый в рядах динамики коэффициент корреляции Пирсона служит характеристикой линейной связи между значениями показателей, но он не учитывает порядок следования «рисунков» изменчивости данных и лишь отчасти учитывает сопряженность динамических рядов по характеру монотонности на каждом временном промежутке (Айвазян, Мхитарян, 2001). Таким образом, он не дает исчерпывающую характеристику связи рядов в динамике. На рис. 3 приведен смоделированный пример, иллюстрирующий это суждение. Два ряда индексов приростов явно демонстрируют сопряженность монотонности, которая нарушается лишь для двух временных периодов ($N = 5$, $N = 15$) из 19-ти представленных, а также близость данных по временным срезам (рис. 3а). Несмотря на это, рассчитанный коэффициент детерминации $R^2 \approx 0.11$ (рис. 3б), что выявляет лишь 11% вариации, обусловленной рассматриваемой связью рядов (соответственно, коэффициент корреляции Пирсона равен $r = 0.33 \ll 1$).

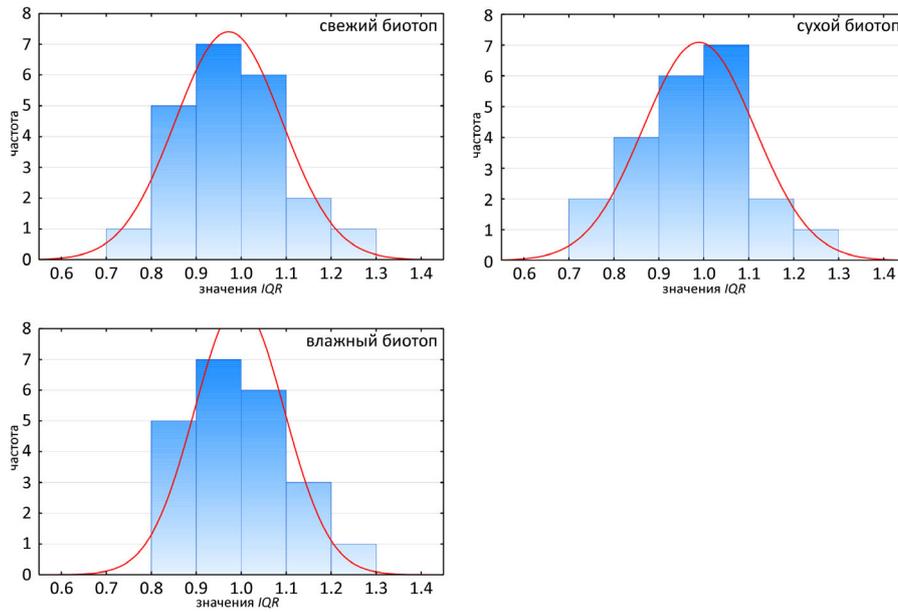


Рисунок 2. Гистограммы для показателя вариабельности *IQR* индексов радиальных приростов
 Ось *x* – значения *IQR*, ось *y* – частота (красная линия – аппроксимация нормальным
 распределением)

Figure 2. IQR values histograms for radial increment indices
 Axis *x* – IQR value, axis *y* – frequency (the red line is the approximation by normal distribution)

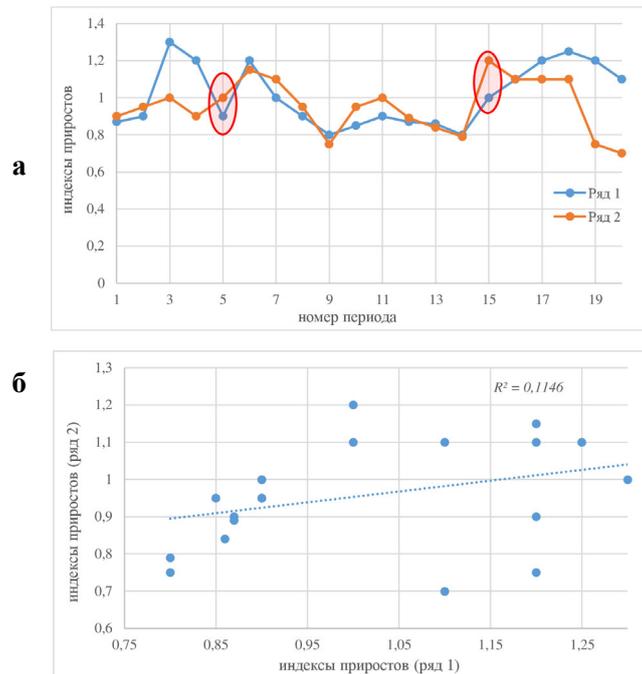


Рисунок 3. Смоделированные значения двух динамических рядов индексов приростов (а)
 и их диаграмма рассеяния (б)

Figure 3. Modeled values of two dynamic series of growth indices (a) and their scatterplot (b)

Поэтому для оценки близости в динамике для вариабельности предлагаем сформировать новый показатель. Наиболее часто используемая в статистике величина среднеквадратического отклонения (СКО) производит сравнение массива данных с его средним значением; она не служит мерой оценки близости рядов динамических данных. Сформируем на ее основе новую характеристику, которая производит оценку поточечных парных отклонений между динамическими данными. Назовем эту величину $СКО_{\text{связи}}$:

$$СКО_{\text{связи},km} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i^k - y_i^m)^2}{n}}, \quad (1)$$

где y_i^k, y_i^m – i -е значение данных k -го и m -го биотопов соответственно, n – объем данных. Но анализ включенных в этот показатель разностей сильно зависит от значений самих данных; эти разности в нашей постановке задачи будут характеризовать отклонения от биотопа к биотопу индексов лишь одного типа прироста: линейного или радиального. Для взаимного сравнения индексов линейных и радиальных приростов и их вариабельности требуется сформировать относительную величину на основе (1), которая будет служить мерой близости динамических данных двух рядов и позволит проводить сравнение в зависимости от типа прироста (линейного или радиального). Рассмотрим показатель близости двух динамических рядов, который по смыслу интерпретации будет аналогом коэффициента вариации в статистике:

$$V_{СКО_{\text{связи}}} = \frac{СКО_{\text{связи},km}}{med_{km}}, \quad (2)$$

где med_{km} – медиана данных для k -го и m -го биотопов, а $СКО_{\text{связи},km}$ – характеризует усредненный квадрат разности между данными k -го и m -го биотопов формулы (1). Для смоделированного примера на рис. 3, несмотря на то, что $R^2 \approx 0.11$, показатель $V_{СКО_{\text{связи}}} \approx 0.03$, что показывает хорошую близость данных по отношению к медианному значению ($СКО_{\text{связи},km}$ близости двух приведенных динамических рядов в 33 раза меньше их медианного значения). Для величины вариабельности IQR индексов линейных и радиальных приростов рассчитанные показатели $V_{СКО_{\text{связи}}}$ сведены в табл. 1.

Таблица 1. Показатели попарной близости динамических рядов $V_{СКО_{\text{связи}}}$ для величин вариабельности IQR индексов линейных и радиальных приростов

Table 1. Pairwise proximity indicators of V_{SD} dynamic series for the IQR variability values of linear and radial increments indices

Сравниваемые биотопы	Прирост	
	линейный	радиальный
свежий-сухой	0.69	0.34
свежий-влажный	1.52	0.35
сухой-влажный	0.64	0.31

Полученные значения показателя попарной близости динамических рядов $V_{\text{СКОсвязи}}$ свидетельствуют о том, что данные для IQR индексов радиальных приростов существенно меньше (приблизительно в 2-4 раза), чем для IQR линейных. Известно, что для часто используемого показателя вариации в статистике есть правило считать выборку однородной, если он не превышает значение 0.35 (Цымбаленко и др., 2007). Чем больше значение коэффициента вариации, тем относительно больший разброс исследуемых значений. Если коэффициент вариации меньше 0.1, то изменчивость данных считают незначительной, от 0.1 до 0.2 – средней, больше 0.2 и меньше 0.35 – значительной. Но если коэффициент вариации превышает 0.35, то это говорит о неоднородности выборки и, возможно, исключения выбросов. Примем значение 0.35 как пороговую характеристику близости/расхождения двух динамических рядов (однородности попарных отклонений), т.е. для показателя попарного сравнения близости динамических рядов $V_{\text{СКОсвязи}}$ (2). Статистические свойства этого показателя подлежат дальнейшему подтверждению. Отметим, что из табл. 1 для IQR индексов радиальных приростов значение от биотопа к биотопу меньше в 3 раза соответствующего им медианного значения, что свидетельствует о близости рядов IQR индексов радиальных приростов. Наивысший показатель получен для IQR индексов линейных приростов при сравнении в свежих и влажных биотопах ($V_{\text{СКОсвязи}}=1.52$, т.е. $V_{\text{СКОсвязи},km}$ для IQR в 1.5 раза превышает их медианное значение), что дополнительно подтверждает полученные визуально результаты для индексов линейных приростов по рис. 1а. Это дает возможность судить о попарной близости показателей IQR в динамике для индексов радиальных приростов при переходе от биотопа к биотопу и расхождении IQR для индексов линейных приростов. Таким образом, характер изменчивости радиальных приростов (и, следовательно, их отклик на воздействие факторов среды) сходен в разных типах биотопов, т.е. во всех условиях произрастания.

При статистической близости вариабельности и ее динамики становится целесообразной и возможной проверка равенства медиан индексов для радиальных приростов всего массива. Дополнительное исследование равенства медианных значений индексов радиальных приростов (в условиях статистической незначимости различий вариабельности) по H -критерию показала незначимые отличия ввиду того, что полученная расчетная статистика критерия имеет значение $p_{value} = 0.83 > \alpha$. Дополнительный расчет показателя $V_{\text{СКОсвязи}}$ по формуле (2) для медианных значений в динамике дает значения 0.14; 0.11; 0.12 при сравнении по парам биотопов: свежий-сухой, свежий-влажный и сухой-влажный соответственно. Эти значения существенно меньше установленного порогового значения 0.35 и, тем самым, демонстрируют хорошую близость медианных значений в динамике для радиальных приростов.

Таким образом проведенное исследование для индексов радиальных приростов показало:

а) статистическую схожесть вариабельности как по всему массиву данных, так и в динамике;

б) статистическую схожесть медианных значений как по всему массиву, так и в динамике.

Полученная статистически обоснованная независимость параметров индексов радиальных приростов от типа биотопа дает возможность проводить наблюдения за радиальными приростами вне зависимости от их местобитания в отличие от линейных.

Заключение

Разработан способ оценки близости (степени синхронности) динамических рядов индексов линейных и радиальных приростов с помощью сформированного показателя на основе коэффициента вариации. Показатель отражает воздействие условий произрастания сосны обыкновенной на статистические характеристики рядов ее линейных и радиальных приростов.

Апробация подхода на материале древостоев сосны обыкновенной *P. sylvestris* комплексного (ландшафтного) заказника «Полярный круг» выявила, что условия произрастания формируют статистически различающиеся отклики линейных и радиальных приростов.

Обосновано, что параметры рядов радиальных приростов для древостоев заказника регионального значения «Полярный круг» на исследованном периоде времени не зависят от характера биотопа. При этом размеры годичных колец подвержены существенно большей изменчивости, чем длины междоузлий, однако вариабельность радиальных приростов более стабильна от биотопа к биотопу.

Опираясь на полученные результаты, можно заключить, что линейные приросты сосны обыкновенной служат информативным объектом для мониторинга лесных экосистем на коротких (до 50 лет) периодах времени, в то время как радиальные приросты являются предпочтительным показателем при ретроспективном анализе воздействия на биоценозы климатов прошлого.

Благодарности

Авторы выражают признательность руководству Беломорской биологической станции имени Н.А. Перцова МГУ имени М.В. Ломоносова – директору, доктору биологических наук Цетлину Александру Борисовичу и заведующему биостанцией Семенову Александру Геннадиевичу за многолетнее плодотворное сотрудничество и предоставленную возможность успешной работы.

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*, М., Госиздат, 57 с.

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

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 географическая*, № 1, с. 93-102.

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 Центральном-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.

Плантариум: открытый онлайн атлас-определитель растений и лишайников России и сопредельных стран – 2007-2021, URL: <https://www.plantarium.ru/>.

Пчелкин, А.В. (2021) Базовые показатели лишеномониторинга на территории Государственного комплексного природного заказника «Полярный круг», *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. 32, № 1-2, с. 71-84, doi: 10.21513/0207-2564-2021-1-2-71-83.

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

Соломина, О.Н., Мацковский, В.В., Жуков, Р.С. (2011) Дендрохронологические «летописи» «Вологда» и «Соловки» как источник данных о климате последнего тысячелетия, *Доклады Академии наук*, т. 439, № 4, с. 539-544.

Сукачев, 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, *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.

Цымбаленко, Т.Т., Байдаков, А.Н., Цымбаленко, О.С., Гладилин, А.В. (2007) *Методы математической статистики в обработке экономической информации*, М., Финансы и статистика, 200 с.

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

Cook, E., Peters, K. (1981) The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies, *Tree-Ring Bulletin*, vol. 41, pp. 45-53.

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.), available at: <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.

Kruskal, W.H., Wallis, W.A. (1952) Use of ranks in one-criterion variance analysis, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 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. 012047 – 10.1088/1755-1315/611/1/012047.

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

Wilson, R., Anchukaitis, K., Briffa, K.R., Büntgen, U., Cook, E., D'arrigo, R., Davi, N., Esper, J., Frank, D., Gunnarson, B., Hegerl, G. (2016) Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long term context, *Quaternary Science Reviews*, vol. 134, pp.1-18.

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> (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) Dendrohronologiya Soloveckih ostrovov [Dendrochronology of the Solovetsky Islands], *Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya*, pp. 394-398.

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 obyknovennoj 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: MGUL*, no. 1(64), pp. 61-67.

Kuhta, A.E., Romyancev, D.E. (2010) Linejnyj i radial'nyj prirosty sosny obyknovennoj 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 obyknovennoj boreal'nyh fitocenzov poberezh'ya Belogo moray [Climate signal in linear growth of scots pine of boreal phytocenoses of the White Sea coas], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. 31, no. 3-4, pp. 33-45, doi:10.21513/0207-2564-2020-3-33-45.

Plantarium: otkrytyj onlajn atlas-opredelitel' rastenij i lishajnikov Rossii i sopredel'nyh stran – 2007-2021 [Plantarium: open online atlas-determinant of plants and lichens of Russia and neighboring countries – 2007-2021], available at: <https://www.plantarium.ru/>.

Pchelkin, A.V. (2021) Bazovye pokazateli lihenomonitoringa na territorii Gosudarstvennogo kompleksnogo prirodnogo zakaznika «Polyarnyj krug» [Basic indicators of lichen monitoring on the territory of the State Integrated Nature Reserve "Polar Circle"], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. 32, no. 1-2, pp. 71-84, doi: 10.21513/0207-2564-2021-1-2-71-83.

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

Solomina, O.N., Mackovskij, V.V., Zhukov, R.S. (2011) Dendrochronologicheskie "letopisi" "Vologda" i "Solovki" kak istochnik dannyh o klimate poslednego tysyacheletiya [Dendrochronological "Chronicles" of Vologda and Solovki as a source of climate data of the last millennium], *Doklady Akademii nauk*, vol. 439, no. 4, pp. 539-544.

Sukachyov, V.N. (1972) *Izbrannye trudy v trekh tomah: Osnovy lesnoj tipologii i biogeocenologii* [Selected works in three volumes: Fundamentals of Forest Typology and Biogeocenology], in E.M. Lavrenko (ed.), 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 potepleniya 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 rezultatov nablyudenij. Razvedochnyj analiz* [Analysis of the results of observations. Exploratory analysis], Moscow, Russia, 696 p.

Tsymbalenko, T.T., Baydakov, A.N., Tsymbalenko, O.S., Gladilin, A.V. (2007) *Metody matematicheskoy statistiki v obrabotke ekonomicheskoy informatsii* [Methods of mathematical statistics in the processing of economic information], Moscow, Russia, 200 p.

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

Cook, E., Peters, K. (1981) The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies, *Tree-Ring Bulletin*, vol. 41, pp. 45-53.

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.), available at: <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 COFECHEA*, pp. 205-221.

Kruskal, W.H., Wallis, W.A. (1952) Use of ranks in one-criterion variance analysis, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 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. 012047 – 10.1088/1755-1315/611/1/012047.

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

Wilson, R., Anchukaitis, K., Briffa, K.R., Büntgen, U., Cook, E., D'arrigo, R., Davi, N., Esper, J., Frank, D., Gunnarson, B., Hegerl, G. (2016) Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long term context, *Quaternary Science Reviews*, vol. 134, pp.1-18.

Статья поступила в редакцию (Received): 14.12.2021.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 05.09.2022.

Для цитирования / For citation:

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, № 3-4, с. 20-36, doi: 10.21513/0207-2564-2022-3-4-20-36.

Maksimova, O.V., Koukhtha, A.E. (2022) Linear and radial growth variability of scots pine depending on growing conditions on the White Sea coast, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXIII, no. 3-4, pp. 20-36, doi: 10.21513/0207-2564-2022-3-4-20-36.